



Universidad del
Rosario

Escuela de Ingeniería,
Ciencia y Tecnología

**ESTUDIO DE VIABILIDAD TECNICA Y ECONOMICA
PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PCH DE
VORTICE GRAVITACIONAL CON EL FIN DE
AUTOGENERAR ENERGIA.**

Presentado para obtener el título de

MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Maria Fernanda Moncayo Pastas

Dirección:

Andres Mauricio Pérez Gordillo

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en energías renovables

Español

La región Amazónica, en particular el departamento del Putumayo, ostenta una significativa reserva de recursos hídricos, contribuyendo aproximadamente con el 24% de este recurso en Colombia al verter sus aguas en el río Amazonas. No obstante, la explotación de este potencial se ha visto limitada debido a la prioridad de conservar la rica biodiversidad de la zona. Además, la participación del departamento en la matriz energética nacional es modesta, representando menos del 1%. La distancia considerable entre el Putumayo y los centros generadores de energía eléctrica impone costos elevados, expuestos a frecuentes fluctuaciones en el suministro eléctrico debido a la vulnerabilidad de las líneas de transmisión. En estos periodos críticos, se recurre a la generación eléctrica mediante plantas Diesel.

Ante este escenario, se propone una solución viable basada en fuentes no convencionales de energía (FNCER), con un enfoque específico en la generación a través de pequeñas centrales hidroeléctricas. Este enfoque permite realizar modificaciones mínimas en el cauce de las fuentes hídricas, preservando así la fauna local. Se plantea la ejecución de un proyecto que evalúe la viabilidad técnica y económica de instalar pequeñas centrales hidroeléctricas en un punto específico de la región.

El estudio propuesto busca determinar el potencial hídrico disponible para establecer qué demanda energética podría satisfacer. Asimismo, se abordarán las diversas tecnologías de pequeñas centrales hidroeléctricas implementadas a nivel internacional y nacional. Se llevará a cabo un análisis económico para evaluar las implicaciones de la instalación de estas centrales en la región. Este enfoque integral tiene como objetivo proporcionar una base sólida para la toma de decisiones respecto a la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas como fuente de energía en el departamento del Putumayo.

The Amazon region, particularly the department of Putumayo, holds a significant reserve of water resources, contributing approximately 24% of this resource in Colombia by flowing its waters into the Amazon River. However, the exploitation of this potential has been limited due to the priority of preserving the rich biodiversity of the area. Additionally, the department's participation in the national energy matrix is modest, representing less than 1%. The considerable distance between Putumayo and power generation centers imposes high costs, exposed to frequent fluctuations in the power supply due to the vulnerability of transmission lines. In these critical periods, electricity generation through diesel plants is used.

Given this scenario, a viable solution is proposed based on unconventional sources of energy (FNCER), with a specific focus on generation through small hydroelectric plants. This approach allows for minimal modifications to the water sources, thus preserving local fauna. The execution of a project is proposed to assess the technical and economic feasibility of installing small hydroelectric plants at a specific point in the region.

The proposed study aims to determine the available water potential to establish what energy demand could be satisfied. Likewise, various technologies of small hydroelectric plants implemented internationally and nationally will be addressed. An economic analysis will be conducted to assess the implications of installing these plants in the region. This comprehensive approach aims to provide a solid foundation for decision-making regarding the implementation of small hydroelectric plants as a source of energy in the department of Putumayo.

TABLA DE CONTENIDO

iv

Capítulo 1 JUSTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	1
Capítulo 2 OBJETIVOS	4
1.1 Objetivo general.....	4
1.2 Objetivos específicos	4
Capítulo 3 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	5
Capítulo 4.....	29
METODOLOGIA.....	29
Capítulo 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
5.1. ANÁLISIS TECNICO:.....	34
5.1.1. Perfil de carga:	34
5.1.2. Caracterización del recurso.....	37
5.1.3. Selección de tecnología.....	47
5.2. ANÁLISIS ECONOMICO	59
5.2.1. Descripción de parámetros económicos.....	59
5.2.2. Regulación aplicable	60
5.2.3. Análisis Financiero	62
Capítulo 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	67
REFERENCIAS.....	69

LISTA DE TABLAS

v

Tabla 1. Comparación de tecnologías PCH's (Propia).....	16
Tabla 2. Consumo mensual de energía	34
Tabla 3. Consumo de Potencia por bloques del Campamento Orito	36
Tabla 4. Dimensiones del conducto Vertical	53
Tabla 5. Dimensionamiento Horizontal de cámara espiral.....	53
Tabla 6. Dimensionamiento Vertical de cámara espiral	53
Tabla 7. Dimensionamiento Canal de aproximación.....	54
Tabla 8. Dimensionamiento de cámara de disipación	54
Tabla 9. Ficha técnica – Turbulent [21].....	57
Tabla 10. Análisis Económico estimado PCH Vortex. Elaboración Propia	63
Tabla 11. Rentabilidad del Proyecto 25 años vida Útil. Elaboración Propia.....	64
Tabla 12. Precio LCOE.....	65

LISTA DE FIGURAS

vi

Figura 1. Orden de mérito [19].	2
Figura 2. Porcentaje de pobreza en el Putumayo [4]	5
Figura 3. ZNI Colombia [20].	6
Figura 4. Estación el Picudo IDEAM, Rio Orito [2]	7
Figura 5. Comportamiento del Caudal del rio Orito (Propia).....	7
Figura 6- Turbina Flujo Libre [32]	10
Figura 7. Turbina Francis[36]	10
Figura 8. Turbina Banki [35]	11
Figura 9. Turbina Kaplan [31]	11
Figura 10. Turbina Vortex (Vortice). [34]	12
Figura 11. Componentes PCH Vórtice gravitacional [21].	13
Figura 12. PCH de Pasada [29].	14
Figura 13. PCH de almacenamiento [28].	14
Figura 14. PCH Flotante [27].	15
Figura 15. PCH de Bombeo [26]	15
Figura 16. Tipos de ingreso - Generación de vórtice [39]	20
Figura 17. Cámara de aproximación [39]	21
Figura 18. Cámara de vórtice [39]	21
Figura 19. Conducto Vertical [39]	22
Figura 20. Cámara de dispersión [39].	22
Figura 21. Compuerta deslizamiento [13]	28
Figura 22. Metodología de la investigación. Fuente Elaboración Propia	33
Figura 23. Consumo de energía ECP -Campo Orito. Elaboración Propia.....	35
Figura 24. Descripción del Afluente	38
Figura 25. Equipo medición.....	39
Figura 26. Mediciones en CANAL	39
Figura 27. Comportamiento del caudal del Rio en el CANAL. Elaboración Propia.....	40
Figura 28. Diagrama de Moody - Factor de Fricción	42
Figura 29. Perfil de velocidad en el CANAL	43
Figura 30. Medición de la velocidad en Canal. Elaboración Propia.....	44
Figura 31. Medición de velocidad (m/s - Anemómetro	45
Figura 32. Pendiente natural del Afluente	46
Figura 33. Cabeza final, Pendiente 1.4%. Elaboración Propia	47
Figura 34. Comportamiento de las turbomáquinas - Turbinas por Altura y caudal bajos [37]	48
Figura 35. Comportamiento del vórtice [8].	50
Figura 36. Rendimiento de turbina con vórtice. [9].	52
Figura 37. Punto de ingreso y salida del canal. Elaboración propia	55
Figura 38. Ubicación de la turbina de vórtice. Elaboración Propia	55
Figura 39. Turbina de vórtice gravitacional.[21]	58
Figura 40. Recibo de la energía del Putumayo S.A.	60
Figura 41. Resolución aplicable al proyecto. Elaboración Propia	60
Figura 42. Factor de planta - Turbina Vortex.....	64
Figura 43. Utilidad Bruta. Elaboración propia.....	65
Figura 44. Valor LCOE KWh - Hidroeléctrica convencional. IRENA [38]	66

Capítulo 1

JUSTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La generación actual de energía eléctrica se basa en gran medida en combustibles fósiles, lo que resulta en la emisión de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, surge la necesidad de explorar tecnologías que reduzcan o eliminen las emisiones asociadas a la producción de energía eléctrica a lo largo de toda su cadena de valor.

Colombia cuenta con abundantes recursos de energías renovables no convencionales, siendo una potencia en energía solar y eólica. Sin embargo, este potencial se encuentra concentrado en áreas específicas del país [16], dejando de lado uno de los recursos que actualmente contribuye con el 68.4% de la generación de energía eléctrica en Colombia, que es la hidráulica [14]. Aunque esta forma de obtención de energía no se clasifica como una Fuente de Energía Renovable No Convencional (FRNC), la tecnología de pequeñas centrales hidroeléctricas PCH si lo es, representada como una solución que aprovecha el recurso hídrico abundante en gran parte del país.

El departamento del Putumayo cuenta con numerosas cuencas hídricas; no obstante, presenta una participación limitada en la matriz energética, lo que resulta en un costo elevado por kilovatio-hora (KWh) en comparación con los departamentos generadores o aquellos cercanos a las fuentes de generación [17]. Debido a su ubicación como uno de los departamentos más distantes y fronterizos, enfrenta significativas fluctuaciones en el suministro eléctrico, lo que obliga a recurrir a plantas eléctricas a base de diésel para satisfacer la demanda energética.

En cuanto a la problemática social, los hechos confirman que el conflicto armado colombiano ha impactado negativamente en el área urbana de la región. Los ataques a subestaciones han dejado a la población sin energía por periodos que superan los 2 meses [18], obligando a los residentes a generar su propia energía mediante plantas diésel en horarios establecidos.

La tecnología que se propone analizar presenta una serie de beneficios y aplicaciones significativas al permitir la generación de energía eléctrica limpia y sostenible. Este enfoque tiene el potencial de disminuir la dependencia del departamento en las áreas que poseen recursos hídricos considerables de fuentes no renovables y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Al aprovechar el abundante recurso hídrico de la región, se busca hacer uso eficiente de un recurso natural disponible, contribuyendo así al desarrollo económico del departamento mediante la reducción del costo del Kilovatio hora en comparación con diversas tecnologías de obtención de energía, como se observa en la figura 1, y fomentando la generación de empleo en la región.

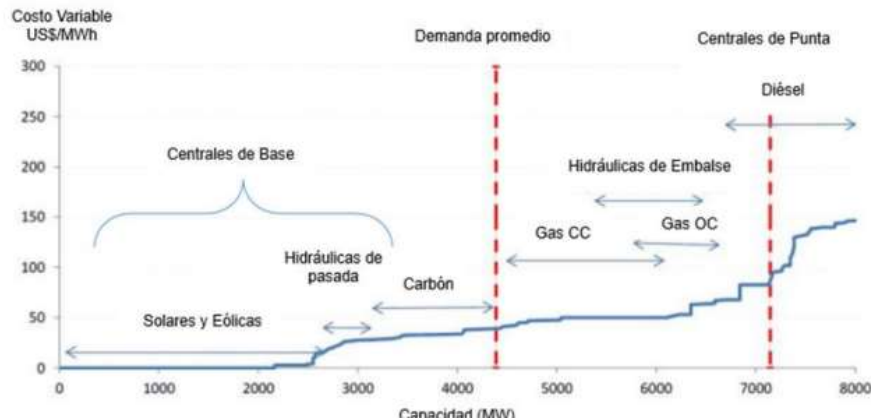


Figura 1. Orden de mérito [19].

Aunque las centrales hidroeléctricas no son consideradas tecnologías inherentemente amigables con el medio ambiente, puesto que generan metano debido a la descomposición de la materia orgánica en los embalses creados por represas, fenómeno conocido como desgasificación del metano, en las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) la emisión de este gas tiende a ser reducida y, en algunos casos, puede eliminarse por completo dependiendo del tipo de implementación. Su aplicación a pequeña escala en la región presenta un enfoque innovador.

La adaptación de esta tecnología a las necesidades específicas de la región, considerando las fluctuaciones constantes de energía y la disponibilidad de recursos hídricos, representa un aspecto distintivo del proyecto. Además, se busca explorar nuevas

estrategias para maximizar la eficiencia y rentabilidad de las pequeñas centrales hidroeléctricas, aportando así un enfoque único a la generación de energía en la región.

La metodología de este proyecto implica una evaluación exhaustiva de las características hidrológicas de la región, junto con un análisis detallado de los requisitos técnicos y económicos para la instalación de las pequeñas centrales hidroeléctricas. Se llevarán a cabo mediciones, cálculos y simulaciones del comportamiento del caudal con el fin de determinar el potencial energético y evaluar la viabilidad del proyecto.

Capítulo 2

OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Realizar una evaluación técnica y económica con el propósito de implementar un sistema de generación de energía basado en pequeñas centrales hidroeléctricas para el campamento Orito de Ecopetrol S.A.

1.2 Objetivos específicos

1. Cuantificar la demanda a suplir.
2. Identificar y caracterizar el recurso hídrico.
3. Revisar y seleccionar tecnologías que permitan aprovechar el recurso hídrico de cabeza baja
4. Realizar el análisis técnico - económico referente a la tecnología apta para generar la cantidad de energía que supla la demanda cuantificada.

Capítulo 3

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

En este capítulo, se realizará la descripción de los conceptos que serán considerados para el desarrollo del proyecto. Se iniciará con el estudio de la demanda a atender, seguido de una caracterización general del recurso hídrico. Posteriormente, se abordarán los tipos de tecnologías y, finalmente, se proporcionará una definición detallada del flujo en canales abiertos y de las turbomáquinas.

ANÁLISIS DE LA DEMANDA:

Condiciones generales del departamento del putumayo:

- Condiciones socioeconómicas:

Según el DANE, para el año 2018 registra una población en el departamento del putumayo de 348.182 en la zona rural y urbana lo que corresponde a menos del 1% del total de la población colombiana [3], sin embargo, es una población con un índice de pobreza alto como muestra en la figura No.2 con un total de 25,1% registrado al 2018 [4].

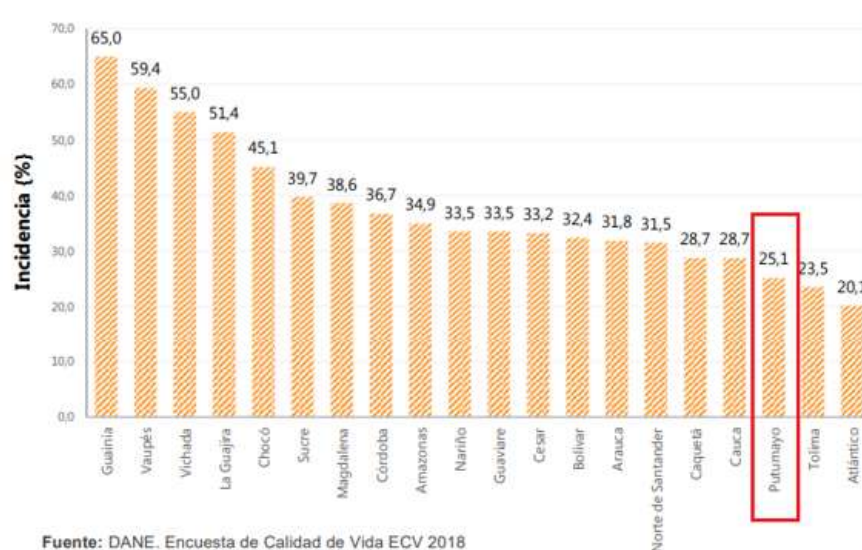


Figura 2. Porcentaje de pobreza en el Putumayo [4]

Su economía depende de la agricultura y de la extracción del petróleo, con una infraestructura del transporte de la energía eléctrica que aún presenta deficiencias y con varias poblaciones indígenas, adicional a ello el departamento es una zona fronteriza, una zona clasificada como mixta SIN - ZIN como se visualiza en la figura 3.



Figura 3. ZNI Colombia [20]

- Condiciones climáticas

En general, el departamento del putumayo cuenta con un clima tropical, con una temperatura entre los 24°C y los 32 °C, con una humedad relativa entre el 95 al 99% en el transcurso del año [5], ya que es un clima tropical tiene alta precipitación con un promedio anual entre 630 a 3.500 mm [6], con una alta humedad relativa por estar dentro de la región amazónica.

- Potencial hídrico de la región:

El departamento del Putumayo cuenta con gran recurso hídrico puesto que se encuentra dentro de la región amazónica. Al departamento lo atraviesan varios

ríos entre ellos afluentes derivados del río Amazonas y Putumayo, apto para el desarrollo de energía eléctrica por medio de fuentes renovables no convencionales, La figura 4 muestra la localización de la estación El Picudo sobre el río Orito, la cual es propiedad del IDEAM y toma medidas de caudal.

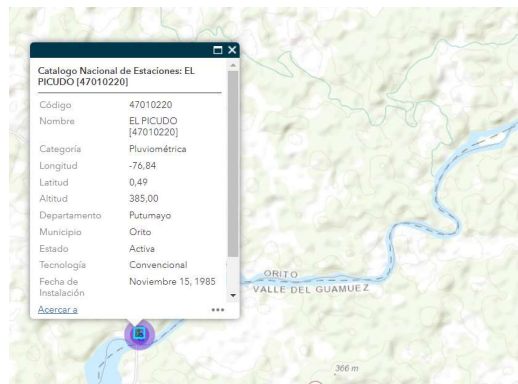


Figura 4. Estación el Picudo IDEAM, Río Orito [2]

La figura 5 muestra el comportamiento del caudal del río a partir de los datos obtenidos de la estación El Picudo.

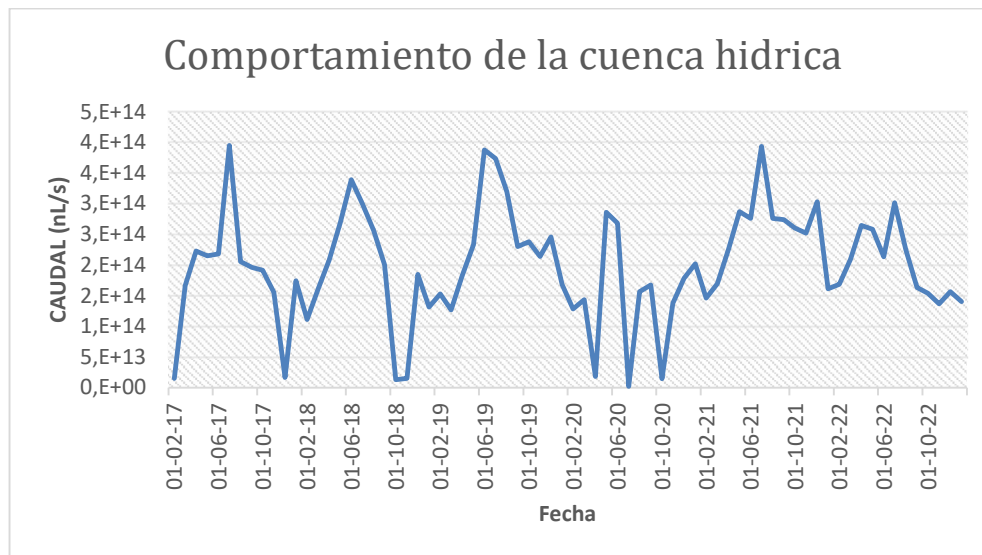


Figura 5. Comportamiento del Caudal del río Orito (Propia)

La información recopilada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) se centra en el caudal promedio registrado por la estación hidrológica El Picudo. El análisis del comportamiento del caudal a lo largo de los años indica una variabilidad en la cantidad de flujo. En la figura 5, el caudal se expresa en nano

litros por segundo (nL/s), lo que, al convertirlo a metros cúbicos por segundo (m^3/s), equivale a un rango entre 100 y 300 m^3/s . Esta variabilidad del caudal contribuye a una comprensión más completa de la dinámica hidrológica en la región durante el período de tiempo estudiado.

CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL HÍDRICO:

En el marco del estudio sobre la viabilidad técnica de la implementación de una pequeña central hidroeléctrica para el campamento Orito de la empresa Ecopetrol, resulta imperativo llevar a cabo una caracterización exhaustiva del recurso, así como evaluar el tipo de Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH) que se puede implementar.

Hidro generación:

La generación de energía eléctrica hidroeléctrica, es importante por varias razones:

- **Renovable y Sostenible:** La energía hidroeléctrica es una fuente de energía renovable, ya que aprovecha el ciclo natural del agua (evaporación, precipitación, flujo de ríos) para generar electricidad. Esto la convierte en una opción sostenible y de bajo impacto ambiental a largo plazo [33].
- **Bajas Emisiones de Gases de Efecto Invernadero:** A diferencia de las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles, la generación hidroeléctrica produce bajas emisiones de gases de efecto invernadero durante la operación normal, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático [33].
- **Suministro Estable y Predecible:** A diferencia de fuentes intermitentes como la solar y la eólica, la generación hidroeléctrica a gran y pequeña escala puede proporcionar un suministro constante de electricidad, lo que contribuye a la estabilidad en la red eléctrica.
- **Desarrollo Económico:** La construcción y operación de proyectos hidroeléctricos pueden generar empleo y contribuir al desarrollo económico en las regiones donde se implementan.
- **Capacidad de Base:** Las centrales hidroeléctricas a gran y pequeña escala pueden actuar como centrales de base, proporcionando energía constante para satisfacer la demanda básica, lo que es esencial para garantizar un suministro eléctrico fiable [33].

- Reducción de Dependencia de Combustibles Fósiles: La generación hidroeléctrica contribuye a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, disminuyendo así la vulnerabilidad ante los cambios en los precios del petróleo y las preocupaciones relacionadas con la seguridad energética.
- Longevidad y Bajo Costo de Operación: Las centrales hidroeléctricas a gran y pequeña escala tienen una vida útil prolongada y, una vez construidas, pueden tener costos de operación relativamente bajos en comparación con otras fuentes de energía.
- Flexibilidad en Escala: La tecnología hidroeléctrica se puede adaptar a diversas escalas, desde pequeñas micro centrales para comunidades locales hasta grandes proyectos de represas para satisfacer las necesidades de una región o país.

Hay dos formas de obtener energía hídrica a gran y pequeña escala tal como se indica a continuación.

Gran Escala:

- Represas Hidroeléctricas:

Consiste en la construcción de grandes represas en ríos para crear embalses de agua. El agua almacenada se libera controladamente para pasar a través de turbinas, generando electricidad.

Los tipos de represas de almacenamiento convencionales y represas de acumulación por bombeo.

- Centrales Hidroeléctricas de Pasada:

Aprovechan el flujo natural de los ríos sin grandes embalses. El agua fluye directamente a través de turbinas, generando electricidad.

Los tipos de centrales pueden ser de flujo continuo, de embalse natural o de embalse pequeño.

Pequeña Escala:

Micro centrales Hidroeléctricas:

Son instalaciones más pequeñas diseñadas para comunidades locales o aplicaciones descentralizadas. Aprovechan pequeños ríos o arroyos.

Los tipos de micro centrales incluyen sistemas de flujo continuo y sistemas de bombeo, tales como los siguientes:

- Turbina de Flujo Libre -Pelton:

Utiliza la corriente del río sin necesidad de un embalse. El agua fluye a través de una turbina, generando electricidad. Los tipos pueden ser helicoidales, de paletas, o tipo tornillo. La turbina tipo paletas se observa en la figura 6.



Figura 6- Turbina Flujo Libre [32]

- Turbina Francis:

En el ámbito de la investigación hidroeléctrica, se aborda la turbina tipo Francis como un componente crucial. Esta turbina, clasificada como de flujo mixto, destaca por su capacidad para adaptarse a diversas condiciones de caudal y altura de caída, lo que la convierte en una opción versátil para la generación de energía hidroeléctrica. A través de un diseño que permite el flujo tanto axial como radial como se observa en la figura 7, la turbina Francis optimiza su rendimiento mediante el ajuste de los álabes, facilitando así un control eficiente del flujo de agua.



Figura 7. Turbina Francis [36]

- Turbina de Michell - Banki:

Dentro del ámbito de investigación en energía hidroeléctrica, la turbina Michell-Banki, también conocida como Banki, emerge como un componente de particular interés. Caracterizada por su diseño de flujo transversal, esta turbina exhibe eficiencia y versatilidad al operar en diversas condiciones de caudal y altura de caída. Su innovadora configuración, que incorpora paletas con geometría única y un flujo de agua circulante de forma tangencial a través de la rueda tal como se observa en la figura 8, maximiza la conversión de energía hidráulica en energía mecánica.

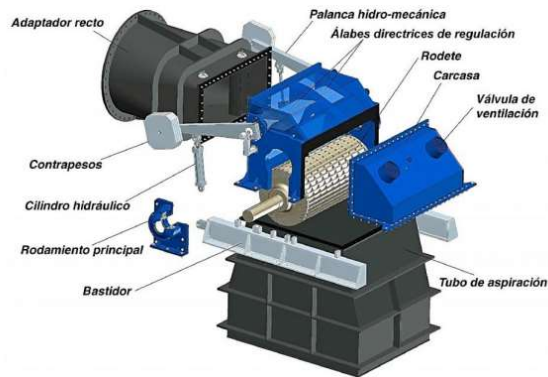


Figura 8. Turbina Banki [35]

- Turbina Kaplan:

Una turbina diseñada específicamente para trabajar con caudales variables, común en ríos con fluctuaciones estacionales. Incluyen turbinas de eje vertical tal como se observa en la figura 9, y turbinas de eje horizontal.

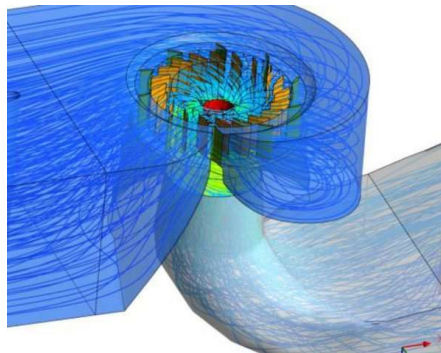


Figura 9. Turbina Kaplan [31]

- Turbina de vórtice:

En el marco de la investigación sobre turbinas hidroeléctricas, se examina específicamente la turbina de vórtice, concentrándose en el contexto de las turbinas de vórtice gravitacional. Estas turbinas se distinguen por su capacidad para aprovechar la energía cinética generada por un vórtice en una cuenca cónica como se observa en la figura 10. Al descender el agua por la cuenca, se forma un vórtice que impulsa las palas de la turbina, convirtiendo esta energía en electricidad. Este estudio se enfoca en explorar las características de las turbinas de vórtice, destacando su idoneidad para entornos con caudales limitados y caídas mínimas.

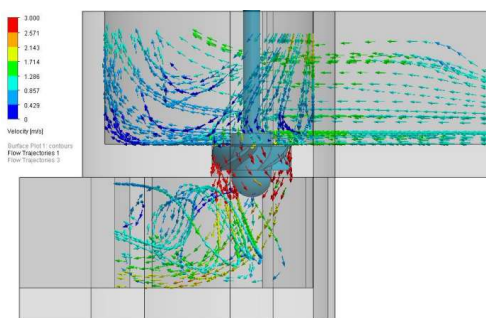


Figura 10. Turbina Vortex (Vórtice). [34]

La pequeña central hidroeléctrica de vórtice gravitacional capta agua de un río o canal para dirigirla hacia una cámara donde se forma un vórtice hidráulico. Este vórtice hace girar una turbina ubicada estratégicamente en el centro, la cual convierte el momentum del agua en energía mecánica. Dicha energía mecánica acciona un generador que la transforma en electricidad, la cual se transmite hacia la red o el lugar de consumo. La central consta de un depósito de entrada, una cámara de vórtice, una turbina, un generador y un sistema de cables para la transmisión tal como se visualiza en la figura 11.

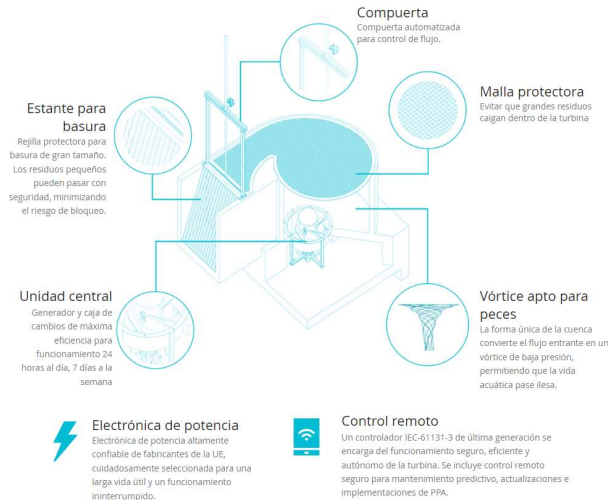


Figura 11. Componentes PCH Vórtice gravitacional [21].

En un diseño prometedor, se están desarrollando turbinas hidroeléctricas de vórtice gravitacional para caídas y caudales bajos. Este enfoque busca aprovechar al máximo el vórtice generado por la turbina. En un artículo científico reciente, se evaluaron métodos numéricos y experimentales utilizando tanques cóncavos y convexos para este propósito. Los resultados indican que el diseño cóncavo produce vórtices más rápidos y claros, con una velocidad de salida un 62% mayor. Por lo tanto, se considera que la geometría cóncava es más eficiente para este tipo de turbinas. [24].

En conclusión, los proyectos a gran escala a menudo requieren mayores inversiones y planificación, mientras que las soluciones a pequeña escala pueden ser más flexibles y adecuadas para comunidades locales o ubicaciones remotas. La elección entre estos enfoques dependerá de factores como el flujo del río, la topografía del terreno y consideraciones ambientales. Teniendo en cuenta la cabeza y el caudal del río.

La investigación se basa en el estudio de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), caracterizadas por tener una capacidad de generación de energía inferior a 10 megavatios (MW).

TIPOS DE TECNOLOGÍAS PARA PCH'S:

1. PCH de pasada: Son las PCH más simples y utilizan el flujo natural del agua de un río o canal sin almacenamiento significativo. El agua se deriva a través de

una presa o un canal hacia una turbina, generando electricidad a medida que fluye. Después de pasar por la turbina, el agua se devuelve al curso de agua sin almacenarse en un embalse, como se aprecia en la figura 12.

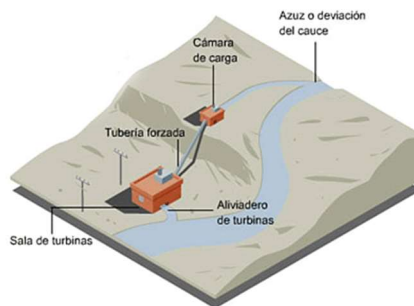


Figura 12. PCH de Pasada [29]

2. PCH de almacenamiento: Estas PCH cuentan con un embalse para almacenar agua y regular el flujo a través de la central. El agua se acumula en el embalse durante períodos de alta disponibilidad y se libera gradualmente para generar electricidad cuando la demanda es mayor. Esto permite una mayor flexibilidad en la generación y un mejor control del flujo de agua, como se aprecia en la figura 13.

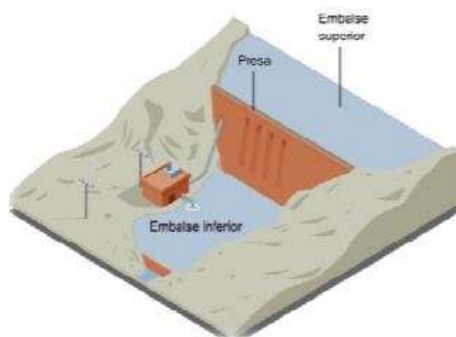


Figura 13. PCH de almacenamiento [28]

3. PCH flotante: Estas PCH se instalan en cuerpos de agua como lagos, embalses o ríos anchos, utilizando estructuras flotantes que soportan las turbinas y los generadores. Este enfoque evita la necesidad de construir presas o diques, y las estructuras flotantes pueden adaptarse a cambios en el nivel del agua, como se aprecia en la figura 14.

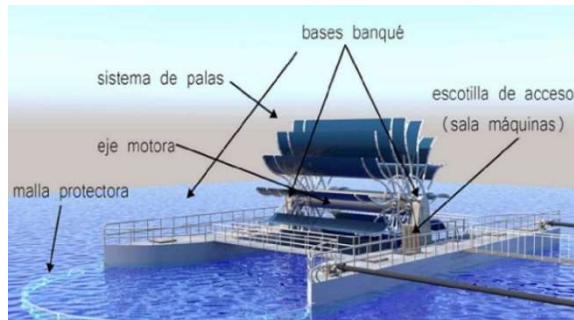


Figura 14. PCH Flotante [27].

4. PCH de bombeo: Este tipo de PCH utiliza electricidad excedente en períodos de baja demanda para bombear agua desde un embalse inferior a un embalse superior. Luego, cuando la demanda de electricidad es alta, el agua se libera del embalse superior a través de una turbina para generar electricidad. Las PCH de bombeo actúan como una forma de almacenamiento de energía, ya que una parte de la electricidad se recupera cuando se necesita, como se aprecia en la figura 15.



Figura 15. PCH de Bombeo [26]

En la tabla 1, se presentan tanto las ventajas como las desventajas asociadas con cada tecnología. Lo relevante de esta representación es que brinda la posibilidad de seleccionar la tecnología que mejor se adapte al contexto de la región y a la caracterización del recurso hídrico. Este análisis detallado permite tomar decisiones informadas en la implementación de la Pequeña Central Hidroeléctrica, considerando las particularidades y condiciones específicas del entorno.

Tabla 1. Comparación de tecnologías PCH's (Propia)

CUADRO COMPARATIVO		
TECNOLOGIA	Ventajas	Desventajas
Pasada	Son más sencillas y económicas de construir en comparación con otras tecnologías. Tienen un menor impacto ambiental y no requieren la construcción de grandes embalses. Son adecuadas para ríos con caudales constantes y sin variaciones significativas en el flujo de agua.	La generación de electricidad está limitada por el flujo de agua disponible. No pueden almacenar agua para periodos de alta demanda y dependen del caudal del río.
Almacenamiento	Permiten un mayor control del flujo de agua, lo que facilita la generación de electricidad según la demanda. Almacenan agua en embalses, lo que proporciona capacidad de regulación y la posibilidad de generar energía en momentos de demanda alta.	Requieren la construcción de embalses, lo que implica un mayor impacto ambiental y costos de inversión más altos. Pueden implicar la reubicación de comunidades debido a la inundación de áreas para la creación de embalses.
Derivación	Minimizan el impacto ambiental y la alteración del cauce natural del río. No requieren la construcción de grandes estructuras como presas. Son adecuadas para ríos con caídas considerables y flujos de agua estables.	La generación de electricidad está limitada por el caudal y la caída del río. Pueden tener una capacidad de generación más limitada en comparación con otras tecnologías.
Flotante	Evitan la necesidad de construir presas o diques, lo que reduce el impacto ambiental y los costos de construcción. Son adaptables a cambios en el nivel del agua y pueden ser instaladas en cuerpos de agua existentes.	La tecnología flotante puede requerir un mayor mantenimiento y ser más susceptible a las condiciones climáticas adversas. La capacidad de generación puede ser limitada en comparación con otras tecnologías.
Bombeo	Actúan como una forma de almacenamiento de energía, permitiendo la recuperación de electricidad en momentos de alta demanda. Contribuyen a la estabilidad del sistema eléctrico y pueden integrarse con otras fuentes de energía renovable.	Requieren el uso de electricidad excedente para bombear agua, lo que puede reducir la eficiencia del sistema. Implican la construcción de embalses tanto en la parte inferior como en la superior, lo que aumenta los costos de inversión.

Para concluir con la clasificación de las tecnologías y turbomáquinas utilizadas en las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), se lleva a cabo un análisis de su implementación a nivel internacional. En diversos lugares se están ejecutando proyectos

destinados a establecer pequeñas centrales hidroeléctricas con una cabeza mínima. Un ejemplo se encuentra en Sudáfrica, donde se investiga cómo mejorar el rendimiento y la eficiencia de las turbinas hidro cinéticas que generan energía a partir de canales y ríos. Entre las técnicas consideradas se incluyen el uso de ductos o difusores para incrementar la velocidad del flujo de agua, ajustes en la configuración de los canales y disposiciones óptimas con múltiples turbinas. Estas iniciativas han demostrado lograr aumentos de hasta el 50% en la producción [23]. Además, se identifica la necesidad de un monitoreo y limpieza regular de residuos para asegurar la vida útil de las turbinas.

En Pakistán se examina en detalle una turbina de vórtice con cuenca cónica, probando numéricamente cinco formas de álabes y seleccionando los tres mejores para pruebas experimentales. El álabe redondeado y curvado presenta la mayor eficiencia mecánica de 48%, superando al álabe cónico y helicoidal. Esto destaca la crucial importancia de la forma de los álabes en el rendimiento de las turbinas de vórtice gravitacional [25].

En conclusión, distintos países exploran alternativas para implementar pequeñas centrales hidroeléctricas aprovechando cabeza mínima, ya sea optimizando turbinas hidro cinéticas convencionales o modelos innovadores como turbinas de vórtice gravitacional, y resaltando la relevancia de aspectos como la geometría de los componentes.

GENERACIÓN DE ENERGIA CABEZA Y CAUDAL BAJO

Vórtice gravitacional

Un vórtice gravitacional hidráulico es un fenómeno fluidodinámico que se manifiesta en sistemas de flujo de agua, como ríos, arroyos o canales abiertos, bajo la influencia de la gravedad. Este tipo de vórtice se forma cuando el agua fluye alrededor de un obstáculo en su curso, lo que da lugar a la creación de un patrón de flujo rotacional. La rotación del agua genera una zona de baja presión en el centro del vórtice, lo que puede tener diversas implicaciones en la dinámica del agua como la generación de turbulencias. Los vórtices gravitacionales hidráulicos pueden variar en tamaño y escala, desde pequeños remolinos hasta grandes sistemas de flujo en corrientes naturales.

Es fundamental mencionar las condiciones de flujo crítico y control de flujo dentro del canal siendo el flujo crítico cuando el número de Froude es igual a 1, lo que indica una

transición entre el flujo subcrítico y supercrítico. En este estado, la velocidad del flujo es tal que la inercia y la gravedad se equilibran. El control del flujo se refiere a la capacidad de regular y dirigir el flujo de manera eficiente en sistemas hidráulicos. Comprender las condiciones de flujo crítico es esencial para el diseño y la optimización de turbinas hidráulicas, ya que permite aprovechar al máximo la energía del agua en movimiento. Además, el control preciso del flujo es fundamental en una variedad de aplicaciones, desde el suministro de agua hasta la generación de energía hidroeléctrica.

El flujo en el canal abierto debe suplir las siguientes características:

Dentro del canal el caudal puede ser controlado por medio del número de Froude (Fr), indicando el estado del flujo hidráulico, clasificándolo como:

- $Fr < 1$: Flujos subcríticos, donde la fuerza de gravedad domina sobre la inercia, caracterizados por aguas tranquilas.
- $Fr > 1$: Flujos supercríticos, donde la inercia es dominante sobre la gravedad, caracterizados por ondas de choque y rápidos.
- $Fr = 1$: Flujo crítico, marcando la transición entre el flujo subcrítico y supercrítico.

Se busca que el fluido sea supercrítico para que la velocidad y la energía cinética sea mayor.

Según la teoría Vortex Drop Shaft, al diseñar estructuras hidráulicas específicas, como pozos de caída o caídas verticales, se puede inducir la formación de vórtices en el flujo de agua. Estos vórtices generados pueden ser aprovechados para la generación de energía hidroeléctrica mediante el uso de dispositivos como turbinas de vórtice. Cuando el agua fluye a través de un pozo de caída diseñado conforme a los principios de la Teoría, se crea un vórtice gravitacional en el centro del pozo debido a la rotación del flujo y la fuerza de gravedad. Este vórtice puede ser dirigido hacia una turbina de vórtice colocada estratégicamente en el camino del flujo de agua.

A continuación, se encuentran la clasificación según el ingreso del agua al vórtice:

1. Ingreso Circular: El ingreso circular es un tipo de vórtice gravitacional que se forma cuando el flujo de agua ingresa a una zona confinada, como un canal o un embalse, y se desplaza alrededor de un punto central en un patrón circular. Se caracteriza por

su forma circular y puede ser provocado por la rotación del agua y la configuración del entorno circundante.

2. Ingreso Scroll: El ingreso Scroll es un tipo de vórtice gravitacional que muestra un patrón de flujo helicoidal o en espiral. Se origina cuando el agua ingresa a una zona confinada y se enrolla alrededor de un eje central en un movimiento similar al de un tornillo. Este tipo de vórtice es común en sistemas de flujo confinado, como conductos o tuberías, y puede ser influenciado por factores como la velocidad y la turbulencia del flujo.
3. Ingreso Espiral: El ingreso espiral es un vórtice gravitacional en el que el agua fluye en una trayectoria en espiral alrededor de un eje central al ingresar a una zona confinada. Se distingue por su forma helicoidal y puede ser provocado por la rotación del agua y la geometría del entorno, como curvas o cambios en la sección transversal del conducto.
4. Ingreso Tangencial: El ingreso tangencial es un tipo de vórtice gravitacional en el que el flujo de agua penetra en una zona confinada y se desplaza en una dirección tangencial alrededor de un punto central. Se caracteriza por su movimiento circular en el plano horizontal y puede observarse en sistemas de flujo confinado, como la entrada de un embalse o la intersección de dos canales.

En la figura No.16 se encuentran de manera gráfica los tipos de ingreso del agua a los tanques de vórtice.

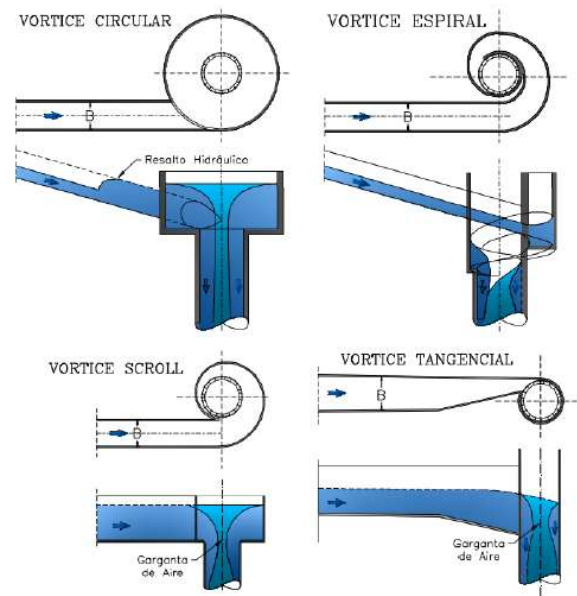


Figura 16. Tipos de ingreso - Generación de vórtice [39]

En la actualidad, el ingreso circular no se utiliza debido a que requiere una gran profundidad del afluente. En 1947, el italiano Drioli investigó el ingreso Scroll, el cual ha sido empleado y aplicado en flujos con clasificación subcrítica [39]. Este método presenta un punto de mayor eficiencia desde el punto de vista hidráulico. El ingreso de espiral es recomendado para zonas montañosas donde se cuente con un flujo supercrítico. Finalmente, se encuentra el ingreso tangencial, el cual trabaja con un fluido subcrítico y no presenta complejidad en la construcción del canal y el tanque.

Con el fin de conocer los elementos y ecuaciones de diseño del canal y tanque, se eligió el ingreso tipo Scroll, puesto que es necesario aprovechar al máximo la eficiencia hídrica del afluente y de esta manera tener un mejor aprovechamiento de la potencia hídrica del mismo.

Componentes del generador de vórtice:

- Canal de aproximación: Se refiere al dimensionamiento de las modificaciones que debe tener el canal para que el fluido subcrítico se estabilice antes de ingresar a la cámara del vórtice, tal como se observa en la figura 17, en donde se recomienda realizar una grada para tal fin [39].

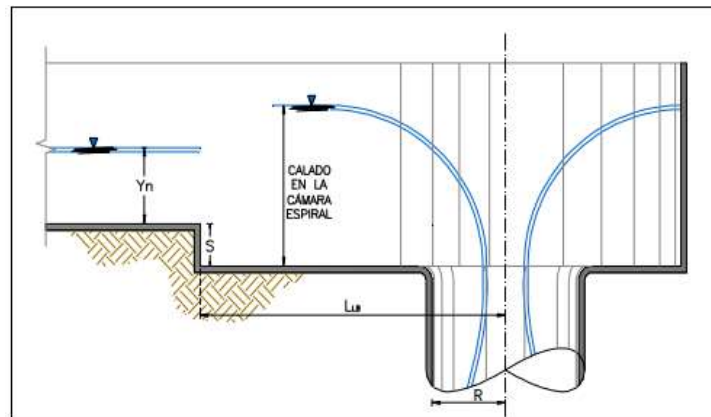


Figura 17. Cámara de aproximación [39]

- Cámara espiral: El pozo es la estructura donde se forma geoméricamente un vórtice con ingreso tipo Scroll, creando un remolino y una cámara de aire, tal como se ilustra en la figura 18. Esta configuración permite aumentar la velocidad del agua debido a la conservación del momento angular.

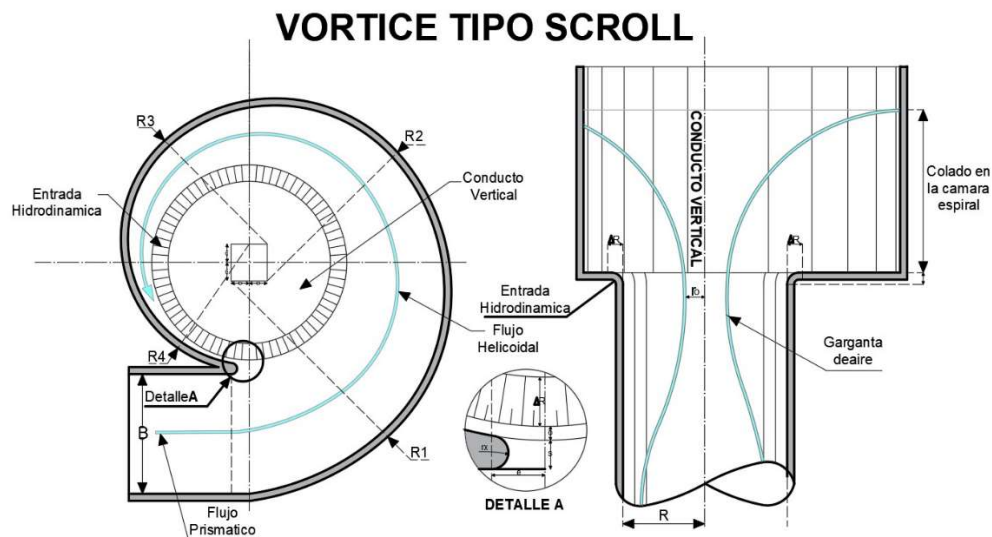


Figura 18. Cámara de vórtice [39]

- Conducto Vertical: Se refiere a la conexión entre la cámara de vórtice y la cámara de dispersión es el encargado de regular el fluido a disponer en el afluente natural por medio de la fricción de las paredes del conducto tal como se visualiza en la figura 19.

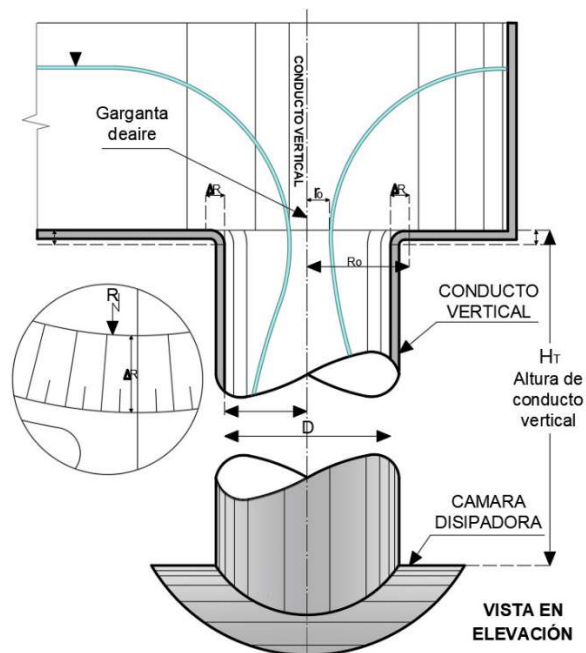


Figura 19. Conducto Vertical [39]

- Cámara de dispersión: La cámara debe tener un material resistente que impida la erosión del componente, el objetivo de la cámara es volver el flujo saliente del conducto en un fluido subcrítico para su posterior condición al vertimiento al afluente natural observado en la figura 20.

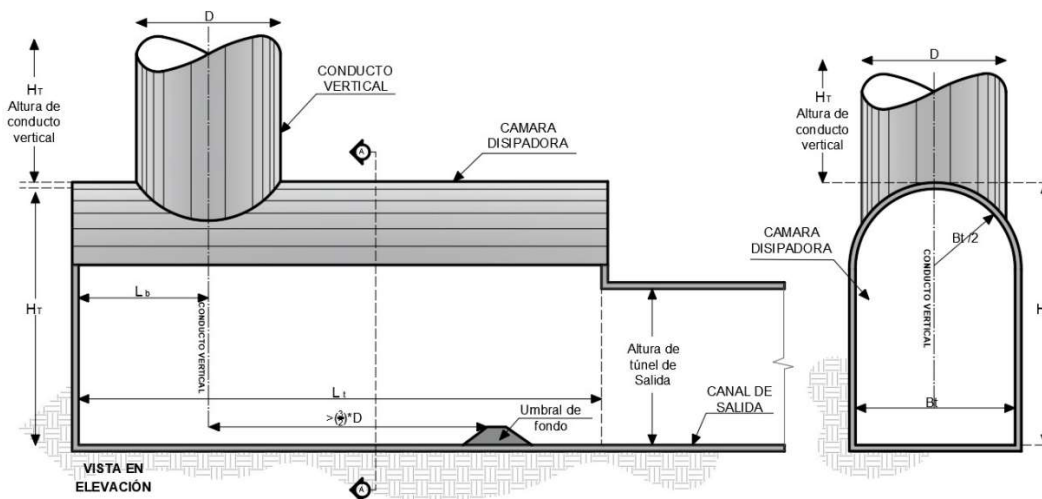


Figura 20. Cámara de dispersión [39]

Dimensionamiento del canal y pozo tipo Scroll:

Con el fin de diseñar el canal y pozo con ingreso tipo Scroll se realizarán los siguientes cálculos para cada uno de los componentes.

- ✓ **Canal de aproximación:** Con el fin de identificar el tipo de fluido que circula por medio del canal se requiere conocer el número de Froude (Fr), por medio del tirante hídrico (Y_n), siguiendo las siguientes ecuaciones:

$$1. Y_n = \sqrt{\frac{A}{2}} \quad [22]$$

En donde,

$Y_n = \text{Tirante Hidrico}$

$A = \text{Área}$

$$2. Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot Y_n}} \quad [22]$$

En donde,

$Fr = \text{Numero de Froude}$

$v = \text{Velocidad}$

$g = \text{Gravedad}$

$Y_n = \text{Tirante Hidrico}$

Se emplea el número de Froude para conocer la altura de la grada utilizada para regular el fluido antes de ingresar a la cámara de vórtice por medio de la siguiente ecuación:

$$S \geq \sqrt{1 - 2 \left(1 + 2(Fr)^2 - Y_n^2 - \frac{2(Fr)^2}{Y_n} \right)} - 1 \quad [39]$$

En donde,

$Fr = \text{Numero de Froude}$

$Y_n = \text{Tirante Hidrico}$

- ✓ **Cámara de Vórtice:** Se procede a conocer cuáles son los radios necesarios para la construcción del pozo en donde se va a generar el vórtice por medio de las siguientes ecuaciones en función de la base del canal.

Las variables que a continuación se calculan se encuentran ilustradas en la figura 18.

Excentricidad (e):

$$e = \frac{B+s}{7} \quad [39]$$

Radio 1 (R₁):

$$R_1 = R + \Delta R + a + 6e \quad [39]$$

Radio 2 (R₂):

$$R_2 = R_1 - 2e \quad [39]$$

Radio 3 (R₃):

$$R_3 = R_1 - 4e \quad [39]$$

Radio 4 (R₄):

$$R_4 = R_1 - 5e \quad [39]$$

Radio de cobertura en Pared (rx)

$$rx = \frac{[(R_4+s)^2 - (R_4^2 + e^2)]}{2(2R_4+s)} \quad [39]$$

Distancia del eje del pozo al eje del canal (Δ)

$$\Delta = R_1 + e - \frac{B}{2} \quad [xx]$$

En donde,

$s, a =$ Dimensiones estructurales

$B =$ Ancho del canal de aproximación

$\Delta R =$ Distancia Horizontal del Radio

- ✓ **Conducto vertical:** Se procede a conocer cuál es la altura ideal para que la fricción del conducto reduzca la velocidad del agua en base al caudal.

Las variables que a continuación se calculan se encuentran ilustradas en la figura 19

Diámetro del conducto vertical (D):

$$D = n \cdot \sqrt[5]{\frac{Q^2}{g}} \quad [39]$$

En donde,

$n =$ Coeficiente de seguridad

$Q =$ Caudal

$g =$ Aceleración de la gravedad

Siendo n, un factor de seguridad para que el núcleo o la garganta de aire no se cierre.

- ✓ **Cámara de dispersión:** Para finalizar, es necesario pasar el flujo a la clasificación subcrítica para su posterior vertimiento en el afluente.

Las variables que a continuación se calculan se encuentran ilustradas en la figura 20.

Distancia entre el eje del conducto vertical a la pared de la cámara disipadora (L_b):

$$L_b = \left[\frac{L_t}{2} \right] [39]$$

Longitud de la cámara disipadora (L_t):

$$L_t \leq 4D [39]$$

Ancho de la cámara disipadora (B_t):

$$\frac{B_t}{D} \leq 1,2 [39]$$

Altura de la cámara disipadora (H_t)

$$\frac{H_t}{D} \leq 1,3 [39]$$

En donde,

$D = \text{Diámetro del conducto}$

Obteniendo de esta manera el máximo rendimiento en un afluente con cabeza y caudales mínimos.

POTENCIAL HIDRICO DEL AFLUENTE:

Flujo en canales abiertos

El flujo en canales abiertos se refiere al movimiento del agua que ocurre en un canal o cauce donde el líquido no está confinado por paredes, sino que fluye en contacto directo con la atmósfera. Canales como ríos, arroyos o los construidos para irrigación, drenaje o generación hidroeléctrica entran en esta categoría.

Analizar las características de este tipo de flujo es clave para gestionar eficientemente los recursos hídricos. Algunas herramientas útiles son [22]:

- **Ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento:** Estas ecuaciones son fundamentales en la mecánica de fluidos y se utilizan para describir el comportamiento del flujo en un sistema. La ecuación de continuidad establece que la masa de fluido que entra en un volumen debe ser igual a la masa que sale, lo que se traduce en una relación entre la velocidad y el área transversal del flujo. Por otro lado, la ecuación de cantidad de movimiento, también conocida

como la segunda ley de Newton para fluidos, establece que la fuerza neta aplicada a un volumen de fluido es igual al cambio de momento del fluido en ese volumen respecto al tiempo. Estas ecuaciones son esenciales para determinar la velocidad y el caudal del flujo en una variedad de aplicaciones.

- Distribución de velocidades y esfuerzos cortantes: La distribución de velocidades en un flujo describe cómo varía la velocidad del fluido en diferentes puntos del sistema. Comprender esta distribución es crucial para optimizar la eficiencia y el diseño de sistemas de flujo, como conductos, tuberías o canales. Los esfuerzos cortantes, por otro lado, se refieren a las fuerzas tangenciales que actúan sobre las capas de fluido adyacentes debido a la diferencia de velocidad entre ellas. Estos esfuerzos son importantes para comprender el comportamiento del flujo cerca de las paredes de los conductos y son críticos en el diseño de sistemas que minimizan la fricción y las pérdidas de energía.

Turbomáquinas hidráulicas

Las turbinas son dispositivos fundamentales en el ámbito de las turbomáquinas, según se expone en el libro de mecánica de fluidos de White [22]. Existen varios tipos de turbinas, cada una diseñada para aplicaciones específicas en función de sus características y eficiencias.

✓ Turbinas de Agua:

- Tipos: Turbinas Pelton, Francis y Kaplan.
- Aplicaciones Típicas:
 1. Pelton: Alta altura y bajo caudal.
 2. Francis: Rango medio de altura y caudal.
 3. Kaplan: Baja altura y alto caudal.
- Eficiencias Típicas:
 1. Pelton: Alta eficiencia en altas alturas entre el 90-95%
 2. Francis: Eficiencia teórica entre 85-92%
 3. Kaplan: Eficiente en bajas alturas con alto caudal entre el 85-92%

Cabe destacar que las eficiencias de las turbinas pueden variar dependiendo de factores específicos de diseño y condiciones operativas.

Algunos conceptos clave para su modelado y diseño óptimo incluyen [22]:

- Grado de reacción: Influye en eficiencia y cavitación.
- Ángulos de álabes y carcasa: Afectan empuje y rendimiento.
- Curvas características: Altura neta, potencia y rendimiento en función del caudal.

Manejar estas herramientas facilita determinar la energía aprovechable y analizar los parámetros ideales de una turbina para su aplicación de pequeña central hidroeléctrica.

Para identificar la potencia hidroeléctrica que puede generar un recurso hídrico, se emplean ecuaciones del principio de la mecánica de fluidos como [22]:

- Potencia mecánica específica: Calcula la rapidez a la que la energía cinética del agua puede hacer trabajo.

$$P_k = \dot{m} \cdot w_k \text{ [22]}$$

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \text{ [22]}$$

$$w_k = g \cdot h \text{ [22]}$$

En donde:

\dot{m} = Flujo Masico

w_k = Energía específica

ρ = Densidad del agua

Q = Caudal

g = Gravedad

h = Altura de caída

Potencia eléctrica entregada

La potencia del recurso hídrico se multiplica por la eficiencia de la turbina seleccionada por medio de las especificaciones técnicas del proveedor [22]:

- Potencia eléctrica: Potencia eléctrica generada por un sistema hidroeléctrico.

$$P_t = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H_n \cdot \eta \text{ [22]}$$

En donde:

ρ = Densidad del agua

Q = Caudal

$g = \text{Gravedad}$

$H_n = \text{Altura neta de caída}$

$n = \text{Eficiencia de la Turbina}$

De esta manera es posible estimar la potencia disponible del recurso hídrico y la potencia eléctrica entregada por la turbina previo a la implementación de un proyecto. Utilizando correctamente estas herramientas se puede predecir la factibilidad energética y económica.

Compuerta reguladora de flujo:

Una compuerta deslizante es un tipo de estructura hidráulica utilizada para controlar el flujo de agua en canales, ríos o sistemas de drenaje. Consiste en una placa plana o paneles verticales que pueden moverse horizontalmente hacia arriba o hacia abajo para abrir o cerrar la abertura a través de la cual fluye el agua. Su función principal es regular el caudal de agua y controlar los niveles de agua en el cuerpo receptor, permitiendo ajustes precisos según las necesidades específicas de la aplicación. Estas compuertas son comunes en proyectos de irrigación, sistemas de drenaje urbano y manejo de aguas residuales, así como en estructuras de control en obras hidráulicas como presas y esclusas, tal como se visualiza en la figura 21.

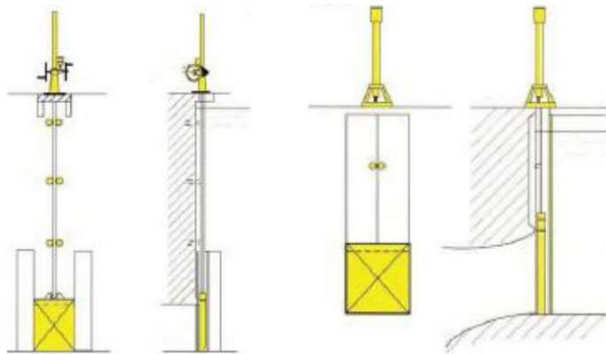


Figura 21. Compuerta deslizamiento [13]

Capítulo 4

METODOLOGIA

La metodología que se aplica en el proyecto se basa en el método científico dando seguimiento a los siguientes pasos:

1. Observación y Recolección de Información:

La recolección de información sobre el potencial hídrico, condiciones climáticas, consumo y generación de energía corresponde a la etapa de observación y recopilación de datos.

2. Planteamiento de Problema y Objetivos:

La formulación de los objetivos específicos, como cuantificar la demanda, caracterizar el recurso hídrico, revisar y seleccionar tecnologías, y realizar un análisis técnico-económico, se alinea con la fase de plantear el problema y los objetivos de investigación.

3. Diseño y Planificación:

La metodología diseñada aborda las distintas fases del estudio y se planifica de manera lógica y secuencial para cumplir con los objetivos propuestos.

4. Experimentación y Análisis:

Las actividades detalladas para cada objetivo implican procesos de experimentación y análisis, como la cuantificación de la demanda, la caracterización del recurso hídrico, la revisión y selección de tecnologías, y el análisis técnico-económico.

5. Interpretación de Resultados:

La interpretación de resultados está implícita en las etapas de análisis exhaustivo de datos, evaluación de tecnologías y análisis técnico-económico.

6. Formulación de Conclusiones y Publicación:

La conclusión de la tesis se basará en los resultados obtenidos, cumpliendo con la fase de formulación de conclusiones, y se espera que la investigación culmine con la presentación y publicación de la tesis.

Ahora bien, durante el desarrollo del proyecto se permitirá conocer el potencial hídrico del afluente, condiciones climáticas de la región, consumo y generación de energía, del campamento Orito de la empresa Ecopetrol S.A., a través de la obtención de

información y mediciones que permita identificar qué tipo de tecnología es la adecuada para las características del recurso hídrico.

Para lograr el primer objetivo, se están evaluando y analizando dos métodos para determinar la demanda a satisfacer. Uno de estos métodos se basa en la revisión y análisis de la curva de carga, utilizando los datos de consumo registrados en las facturas emitidas por la comercializadora de energía eléctrica de la región. Estos datos provienen del medidor ubicado en la subestación del campamento durante los meses de desarrollo del proyecto de energía, y se centran en la energía activa, un enfoque ampliamente reconocido para identificar la demanda mediante la consolidación de datos de consumo energético.

Este enfoque implica estudiar y evaluar los patrones de consumo de energía eléctrica a lo largo del tiempo, típicamente en intervalos específicos. El segundo método consiste en recopilar información de consumo de los bloques dentro del campamento Orito. Finalmente, se analizarán los datos obtenidos mediante estas metodologías para determinar la demanda que debe ser cubierta.

En relación con el segundo objetivo, dirigido a la caracterización del recurso hídrico, se inicia con el dimensionamiento del canal y el tanque en donde debe formarse el vórtice tipo Scroll, empleando las ecuaciones mencionadas en el marco teórico, seguido de ello hay tres métodos distintos de medición:

Método GIS HEC-HMS: Uno de los enfoques más avanzados consiste en el uso de un sistema de información geográfica (GIS), que ha sido implementado exitosamente en diversas ubicaciones alrededor del mundo. Este sistema utiliza el método HEC-HMS, un software especializado en modelar hidrología y analizar el comportamiento de cuencas fluviales. Este software se revela como una herramienta valiosa para la gestión y planificación de recursos hídricos. En este caso particular, resulta esencial para llevar a cabo una evaluación precisa del recurso hídrico mencionado anteriormente. El GIS posibilita la obtención de información detallada, que incluye la curva de duración del flujo, la identificación de sitios estratégicos y la estimación de la generación de energía en cada uno de estos puntos. Estos datos son fundamentales para la toma de decisiones informada y la planificación efectiva de la implementación de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en la región.

Método Campaña de medición – Estación Hídrica: El segundo enfoque para caracterizar es la implementación de una estación hídrica, la cual es una instalación que se utiliza para medir varios parámetros hidrológicos de un río, arroyo, canal o cualquier corriente de agua abierta. Su funcionamiento típico es el siguiente: cuenta con una estructura transversal que atraviesa el ancho del canal o cauce de agua, y en la estructura se instalan instrumentos de medición como un sensor hidrométrico para medir los niveles de agua y velocidad del agua. Los datos de nivel de agua y velocidad son registrados por un datalogger en la estación y pueden ser transmitidos en tiempo real o descargados periódicamente para su procesamiento. Con esta información se puede determinar el caudal volumétrico que pasa por la sección transversal del canal o río donde está la estación hidrométrica. La medición sistemática de los caudales en ríos o canales es esencial para cuantificar los recursos hídricos disponibles para proyectos hidroeléctricos.

Método Aforos de Caudal: El tercer método de medición se lleva a cabo mediante aforos, los cuales posibilitan la medición del flujo volumétrico de agua que atraviesa una sección transversal de un río, canal o corriente. Este enfoque se utiliza para cuantificar la disponibilidad del recurso hídrico en lugares donde no hay una estación hidrométrica automatizada. Los aforos manuales permiten caracterizar la cantidad de agua disponible para proyectos de generación hidroeléctrica, cumpliendo con las normativas establecidas por el Ministerio de Ambiente encontradas en el Protocolo de monitoreo y seguimiento del agua 2021. El objetivo es establecer una correlación entre los datos recopilados y la estación de medición más cercana al afluente, garantizando así la adhesión integral a las regulaciones ambientales. Este enfoque contribuye significativamente a la obtención de información confiable y a la evaluación de las condiciones del recurso hídrico en consideración.

A continuación, se elige el método No. 03 por su disponibilidad durante el desarrollo del proyecto, empleando la información proporcionada por el IDEAM sobre el protocolo de monitoreo y seguimiento del agua del año 2021. Este método implica la realización de mediciones periódicas de velocidad utilizando el protocolo de aforos, con el objetivo de determinar el caudal circulante en el canal. Se recomienda el uso de un molinete hidrométrico con posicionamiento vertical para llevar a cabo estas mediciones. Se sugiere

la instalación de una regla o puntos fijos a lo largo del ancho del afluente, con una distancia entre 15 y 25 puntos en total. Es fundamental garantizar que no más del 10% de la altura del afluente se sumerja, ya que esto podría ocasionar lecturas incorrectas debido a sobreestimaciones o subestimaciones. El objetivo es obtener una comprensión completa y precisa del recurso hídrico en estudio, se emplearán dos equipos de medición, el anemómetro y medidor de agua ubicado en un tramo de tubería de 2 ½”.

En lo referente al cumplimiento del tercer objetivo, el cual se centra en la revisión y selección de tecnologías para aprovechar el recurso hídrico de cabeza baja, se realizará un análisis fundamentado en el potencial del recurso y la demanda a satisfacer. Este análisis se basará en variables tales como el caudal, la altura o pendiente, la energía específica, el flujo másico, entre otras. La información recopilada a partir de estas variables permitirá realizar la selección adecuada de la tecnología de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) para su dimensionamiento, para la medición de la pendiente se empleará el equipo de medición altímetro en dos puntos del afluente.

Finalmente, para lograr el cuarto objetivo, que involucra la realización de un análisis técnico económico de la tecnología seleccionada, se considerará la potencia del recurso hídrico junto con la eficiencia proporcionada según la ficha técnica del proveedor para determinar el porcentaje de la carga que se podrá atender. Posteriormente, se abordará el aspecto del marketing mediante el marco regulatorio colombiano del proyecto para diseñar estrategias efectivas de financiación. La evaluación de la viabilidad económica se llevará a cabo en función de los precios proporcionados por el proveedor, donde se incluirán los costos asociados a la instalación y operación de la tecnología seleccionada. Este enfoque integral permitirá evaluar la viabilidad y eficacia de la tecnología seleccionada en términos tanto técnicos como económicos. En la Figura 22 se presenta detalladamente el procedimiento de la metodología del proyecto.



Figura 22. Metodología de la investigación. Fuente Elaboración Propia

Capítulo 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. ANALISIS TECNICO:

5.1.1. Perfil de carga:

Orito, es un municipio ubicado en el departamento del Putumayo, se encuentra aproximadamente a 3 horas de Mocoa, la capital del departamento, con coordenadas geográficas de latitud 0° 39' 58" N y longitud 76°52'15" W. [10]. Es importante destacar que la demanda a atender está localizada dentro del campamento Orito, perteneciente a la empresa Ecopetrol S.A., y sus coordenadas geográficas son latitud 0°40'39.8"N y longitud 76°52'38.3"W. [10].

Este campamento se abastece principalmente de la red nacional; no obstante, en casos de fallas en la red, se suministra energía mediante plantas eléctricas a base de Diesel.

La demanda de energía se estimó a partir de la información de las facturas de energía correspondientes al periodo entre julio a octubre del 2023 de la empresa Generadora y Comercializadora de Energía del Caribe (GECELCA), que presta servicios en la zona, información consolidada en la tabla 2.

Tabla 2. Consumo mensual de energía

Consumo de energía 2023			
Mes	Costo KWh	Consumo Energía Activa KW	VR A Pagar
JULIO	\$ 592,91	12.314	\$ 7.301.063
AGOSTO	\$ 596,45	3.615	\$ 2.156.179
SEPTIEMBRE	\$ 850,92	9.274	\$ 7.891.400
OCTUBRE	\$ 813,56	23.547	\$ 19.156.865
CONSUMO PROMEDIO		12.188	

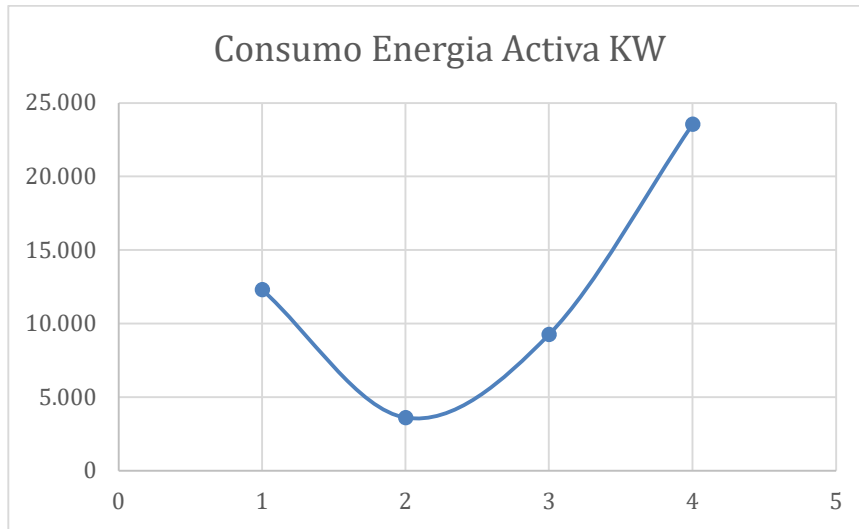


Figura 23. Consumo de energía ECP -Campo Orito. Elaboración Propia

En la Figura No. 23, se observa que, durante los 4 meses analizados, se consumieron un total de 48.750 kW de energía activa. El consumo promedio mensual se situó en 12.188 kW, y el monto total facturado únicamente por concepto de energía activa en este periodo de 4 meses ascendió a \$36.505.507 COP.

El consumo pico es el registrado en el mes de octubre con un total de 23.547 kWh, por lo cual resulta imperativo conocer cuál es la potencia de demanda que se requiere atender, de tal manera que el consumo pico se divide entre 30 días del mes y 24 horas del día obteniendo como resultado un promedio aproximado total de **32.7 kW**.

Ahora bien, siguiendo la metodología planteada se realiza la recopilación de la información por consumo de los equipos y elementos instalados en cada bloque o edificio del campamento orito, tal como se observa en la tabla 3, tomando en cuenta variables como:

- Consumo por Equipo o elemento
- Cantidad de equipos o elementos
- Porcentaje de uso de equipos o elementos

Tabla 3. Consumo de Potencia por bloques del Campamento Orito

Edificación	Equipos de refrigeración					Elementos eléctricos	
	TIPO	Cant	Consumo Mensual kWh	%Uso	TOTAL mensual kWh	Total lum Mensual kWh	Total tomas
CLUB RUMIYACO	Minisplit	1	195	100%	195	231,756	108
	Manejadora	3	795,6	60%	1.432		
BLOQUE DE OPERACIONES Y MANTENIMIENTO	Minisplit	20	195	100%	3.900	866,8	342
BLOQUE GERENCIA GPY	Minisplit	5	195	100%	975	345,6	140
	Central	2	795,6	80%	1.273		
BLOQUE VIT	Minisplit	5	195	100%	975	820,8	108
BODEGA DE MATERIALES -ALIADOS Y GESTIÓN DOCUMENTAL	Minisplit	11	195	100%	2.145	265,9	148
BLOQUE DE PROYECTOS	Minisplit	4	195	70%	546	473,04	386
	Paquete	1	856	100%	856		
CAMPAMENTO HABITACIONES.	Minisplit	90	195	80%	14.040	568	893
	Chiller	1	1440	80%	1.152		
CASINO ORITO	Minisplit	5	195	100%	975	439,2	216
	Paquete	4	795,6	100%	3.182		
	Cuarto Frio	3	795,6	100%	2.387		
BLOQUE DE COMUNICACIONES	Minisplit	2	195	100%	390	147,2	81
AULAS DE CAPACITACION	Minisplit	2	195	60%	234	24	47
BLOQUE DE SERVICIOS GSC	Minisplit	16	195	90%	2.808	259,52	180
CAT ORITO	Minisplit	1	195	100%	195	419,2	108
	Paquete	2	795,6	100%	1.591		
PORTERÍA CAMPO ORITO	Minisplit	1	195	100%	195	36	45
UNIS	Minisplit	3	195	100%	585	513,4	737
	Chiller	1	1440	100%	1.440		
41.471						5410	3.539
TOTAL CONSUMO MENSUAL kWh							50.421
TOTAL CONSUMO MENSUAL kW							70

Obteniendo de esta manera un total de consumo o disponibilidad de carga en el campamento de **70 kW** de potencia energética.

Comparando el método de curva de carga y el método de consumo total disponible por los bloques que componen el campamento Orito se evidencia que la demanda en el método 1 tiene un comportamiento creciente por tanto se maneja un factor de incertidumbre alto en relación a los meses analizados respecto al total de meses en el año. Si se dispone únicamente de datos de demanda energética para 4 meses de los 12 que tiene el año, el factor de incertidumbre se establece en 1/3. Esto significa que solo se está utilizando alrededor de un tercio del año para el análisis de la curva de carga, lo que puede generar una incertidumbre significativa en la precisión de los resultados.

Por consiguiente, el método 2, no tiene margen de incertidumbre puesto que es información real suministrada por el operador de las instalaciones en mención. En conclusión, el valor a tener en cuenta en adelante será de **70 kW** de potencia eléctrica.

Este valor se establecerá como uno de los parámetros de comparación clave, que permitirá evidenciar si la demanda puede ser satisfecha mediante el estudio técnico para la implementación de una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH).

5.1.2. Caracterización del recurso.

El recurso hídrico a evaluar se encuentra ubicado en el municipio Orito del departamento del Putumayo, en el río Luzanyaco puntualmente en las coordenadas 0°40'54.6"N 76°52'28.7"W, el cual se encuentra aledaño al predio de la empresa Ecopetrol S.A., puntualmente en el canal que se encuentra junto a la captación de agua para consumo del campamento.

Se evalúa el punto exacto para el cual se pueda obtener un mayor beneficio o eficiencia dándole seguimiento a las siguientes instrucciones que emite el ministerio de ambiente en el protocolo de monitoreo y seguimiento del agua 2021[11]:

1. La sección debe estar situada en un tramo recto de la corriente. En lo posible, la longitud del tramo debe tener un mínimo equivalente a cinco (5) veces el ancho de la sección. [11]
2. El lecho del río debe ser de geometría regular y cauce estable, tanto en perfil longitudinal como transversal y no tener obstáculos (troncos de árboles, grandes rocas, vegetación, etc.). Se deben evitar los lechos fangosos. [11]
3. Preferiblemente, la sección transversal seleccionada debe tener forma de “U” o “V”. [11]

Para ello, en la figura 24 se observa que el punto donde se tiene previsto llevar a cabo la caracterización se encuentra despejado de obstáculos, presentando además una sección transversal en forma de V.

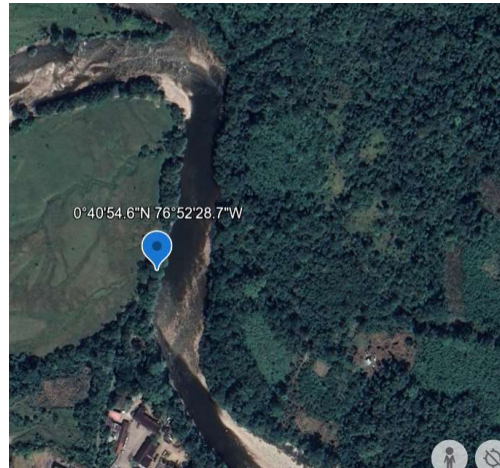


Figura 24. Descripción del Afluente

Se recomiendan mediciones cada 12 horas, en este caso se tomó una a las 6:00 am y otra a las 6:00 pm, y varias adicionales de ser el caso cuando el río crezca. [11].

Dadas las condiciones económicas y la ausencia de equipos certificados para realizar la toma de los aforos pertinentes tal como lo recomienda el ministerio, se procede a realizar un equipo de medición que permita aforar el caudal del canal.

Equipo de medición 1.

Dentro del estado del arte, se destaca la existencia de tres métodos para la medición del caudal. Entre ellos, se encuentra el enfoque que se adapta a la medición experimental utilizando el recurso disponible, conocido como aforos de caudal manual. En este método, se desarrolla un equipo de medición que es capaz de proporcionar un promedio de caudal. Este equipo está compuesto por un medidor de flujo convencional de 2 ½”, el cual posee las siguientes características:

- Máxima presión admisible: 16 MPa
- Clase de precisión: 2
- Resolución: 0,05 L

Acoplado a una tubería de la misma dimensión como se aprecia en la figura 25.



Figura 25. Equipo medición

A continuación, se considera la instrucción 1 del protocolo de monitoreo y seguimiento del agua 2021[11], asegurándose de realizar las mediciones con el equipo mencionado, el cual posee un diámetro de 2 ½ pulgadas. Estas mediciones se llevan a cabo a lo largo del ancho del canal. Además, se efectúan 22 mediciones de manera descendente del canal.

Posteriormente, las mediciones ascienden a 308 datos tomados durante 8 días, los cuales son sumados, ya que abarcan el área de entrada al canal, tal como se muestra en la figura 26.

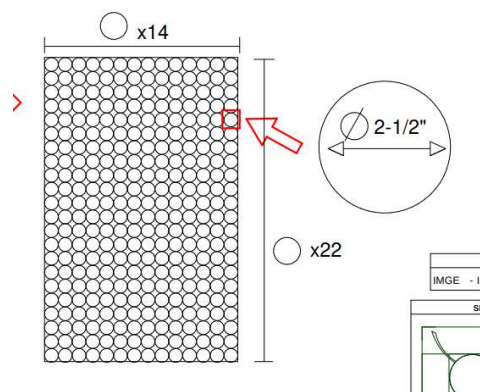


Figura 26. Mediciones en CANAL

La suma de las mediciones promedio del área transversal proporciona el volumen total del canal hídrico, expresado en metros cúbicos. La toma de muestras en cada punto

se realiza durante un período de 10 minutos. Estos datos se recopilan a lo largo de ocho (08) días. En la Figura 27, se puede observar el comportamiento del volumen que pasa por el canal mencionado anteriormente.

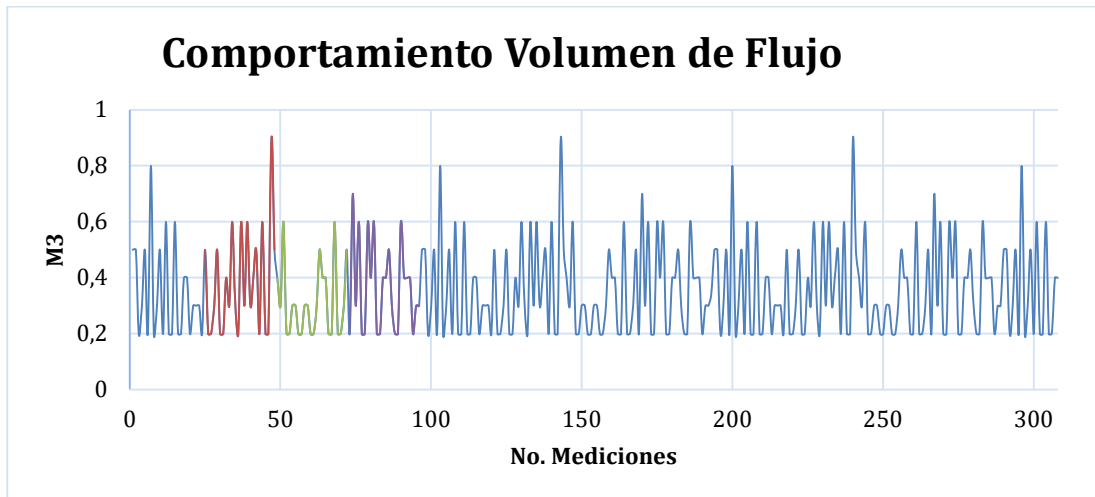


Figura 27. Comportamiento del caudal del Rio en el CANAL. Elaboración Propia

El comportamiento del caudal dentro del canal es estable, y la suma de la cantidad de las 308 mediciones es de 108.74 m^3 por 10 min, convirtiendo los m^3/min se obtiene un total de $10.87 \text{ m}^3/\text{min}$ y pasando a unidades de medida del Sistema internacional de unidades tendría un total de $0,19 \text{ m}^3/\text{s}$.

Sin embargo, el método de medición experimental no es confiable puesto que la distancia que debe recorrer el agua para ser medida es muy larga adicional a ello las perdidas por fricción son considerablemente altas.

La ecuación de Darcy-Weisbach, se emplea con el fin de conocer la pérdida de carga (h_f) del fluido al ingresar al equipo experimental:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

En donde:

f = Factor de fricción

V = Velocidad

g = Gravedad

L = Longitud

$D = \text{Diámetro}$

Con el fin de conocer la pérdida de carga por fricción en el ducto del equipo de medición, es necesario conocer variables como el número de Reynold y el factor de fricción para ello se aplican las siguientes formulas:

1. Numero de Reynolds (Re):

$$Re = \frac{DV\rho}{\mu} \quad [22]$$

En donde,

$D = \text{Diámetro}$

$V = \text{Velocidad}$

$\rho = \text{Densidad}$

$\mu = \text{Viscosidad dinamica}$

En donde el diámetro del ducto de 2 ½ In, la pasamos a metros igual a 0.0635m, con una velocidad de 1,5 m/s, la densidad y viscosidad dinámica son datos normalizados para el tipo de fluido que en este caso es el agua, obteniendo el número de Reynolds aproximado para este flujo de 95099. Dado que este valor es mucho mayor que 4000, en conclusión, el flujo es turbulento.

2. Factor de fricción de Darcy (f): Al tratarse de un flujo turbulente es necesario validar que numero de fricción se obtiene por medio del diagrama de Moody visualizado en la figura 28.

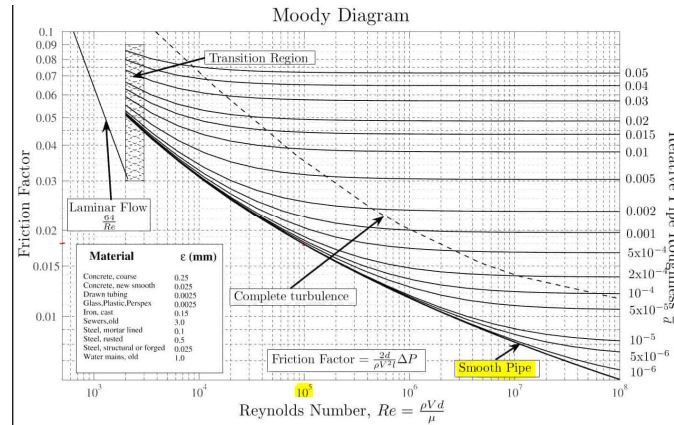


Figura 28. Diagrama de Moody - Factor de Fricción

En donde, aproximadamente el factor de fricción es igual a 0,018 el cual se emplea como variable dentro de la ecuación de pérdida de carga descrita anteriormente por lo que el valor de la pérdida es igual a 0,2 expresada como una pérdida de carga que la altura del agua en el sistema se reduce en 0.2 unidades de longitud en metros, debido a la resistencia al flujo en el sistema, alterando de esta manera el resultado de la lectura de la medición.

Ahora bien, el método de medición 1, se descarta por la incertidumbre de sus valores, sin embargo, podemos emplear la información para conocer el perfil de velocidades dentro del canal visualizado en la figura 29.

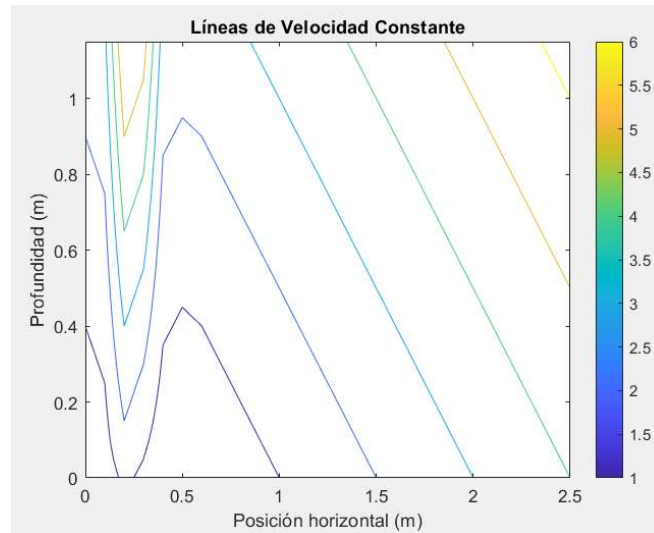


Figura 29. Perfil de velocidad en el CANAL

Con base en los valores recopilados durante las mediciones, se ha generado un perfil de velocidad en el canal a lo largo de los 5 días de muestreo. En el eje vertical se representa la profundidad en metros (m), mientras que en el eje horizontal se muestra la posición a lo ancho del canal, la información correspondiente a la velocidad constante del flujo medido en la proyección del canal abierto se ilustra por medio de líneas de velocidad. Se observa que las velocidades más altas se encuentran cerca de la superficie y en el centro del canal. Esto se observa por las líneas de contorno de mayor valor definido por colores más cálida, así como las velocidades disminuyen hacia los bordes y hacia el fondo del canal. Las líneas de contorno de menor valor definidos por colores más fríos se localizan cerca de las paredes laterales y en las profundidades mayores. Indicando la distribución de velocidades sugiere un perfil típico de flujo en canales abiertos, con velocidades máximas en la superficie y centro, y velocidades menores cerca de las fronteras sólidas debido a la fricción.

Equipo de medición 2:

Para evaluar el recurso con el anemómetro, se siguen los lineamientos de medición establecidos por el protocolo de monitoreo del IDEAM, como se ilustra en la figura 26.

Se realizan mediciones dos veces al día durante 5 días se pudo observar que durante este periodo de tiempo el caudal mostró un comportamiento estable como se visualiza en la figura 30.

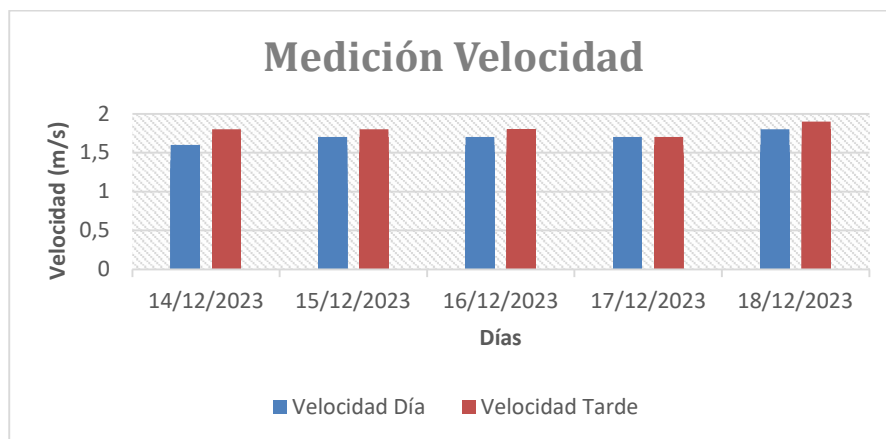


Figura 30. Medición de la velocidad en Canal. Elaboración Propia

Obteniendo como resultado la siguiente información:

- Media: 1,508 m/s
- Varianza: 0,042
- Desviación estándar: 0,206

Analizando el conjunto de datos, se ha calculado una desviación estándar del 20.6%. Esta medida indica la magnitud de la dispersión de los valores con respecto a la media. En este caso, una desviación estándar del 20.6% sugiere una moderada variabilidad en los datos. Valores más altos indicarían una mayor dispersión, mientras que valores más bajos señalarían una mayor consistencia alrededor de la media. Es crucial considerar esta información al interpretar la fiabilidad y la consistencia de los datos, así como para comprender la amplitud de la variabilidad presente en el conjunto de observaciones.

La velocidad media del agua es de 1.5 m/s, la cual se utiliza para determinar el potencial hídrico del recurso en evaluación.

Siguiendo las recomendaciones, se realiza la medición tal como se observa en la figura 31.



Figura 31. Medición de velocidad (m/s - Anemómetro)

Con la ecuación de continuidad se obtiene el valor del caudal por medio de la velocidad promedio medida de tal manera que:

$$Q = V * A \text{ [22]}$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

V = Velocidad promedio (m/s)

A = Área de la sección transversal (m^2)

Utilizando la ecuación anterior, sustituimos el valor de la velocidad media, que es igual a 1,5 m/s, y el área transversal del canal. El área se obtiene multiplicando 2,5 m (el ancho del canal) por 1,2 m (la altura del canal), lo que nos da un área igual a 3 m^2 .

$$Q = 1.5 \frac{m}{s} * 3m^2$$

Como resultado obtenemos un caudal de **4,5 m^3/s** .

Para poder concluir la cantidad de energía que se obtendría por medio de la turbina es necesario conocer la pendiente en donde se tienen en cuenta el punto 1 y 2 como se observa en la figura 32.

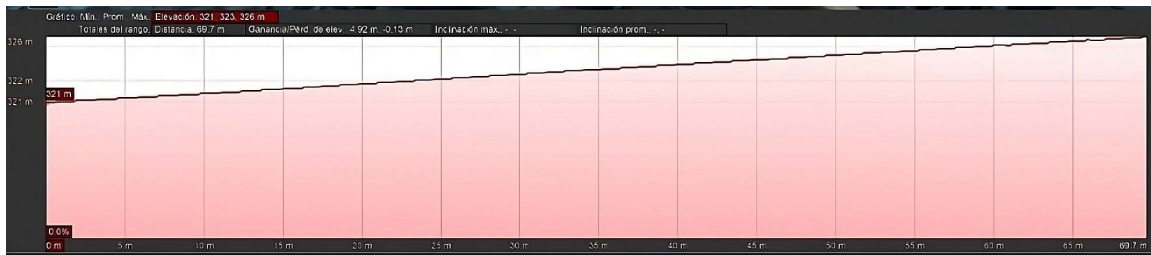


Figura 32. Pendiente natural del Afluente

La turbina específica que se planea instalar, de la empresa Turbulent, requiere una diferencia de altura mínima de 1.5 metros entre la entrada y la salida para garantizar una generación de energía adecuada según sus especificaciones técnicas [21].

Sin embargo, el terreno natural en el sitio del proyecto no proporciona una caída suficiente para cumplir con este requisito. A lo largo de una distancia de 70 metros, el terreno tiene una pendiente natural del 3%, lo que resulta en una caída total de 3.3 metros. Pero esta caída no está concentrada en un solo punto, sino que está distribuida gradualmente a lo largo de la distancia.

Para obtener la caída necesaria de al menos 1.5 metros en un punto específico donde se instalará la turbina, es necesario crear una caída artificial. Esto se logra mediante la construcción de un canal abierto con una pendiente controlada.

En este caso, se ha optado por diseñar el canal con una pendiente mínima del 1%. Esta pendiente más suave asegura que el agua fluya sin problemas a lo largo del canal y evita la acumulación excesiva de sedimentos. Con esta configuración, se puede obtener una caída concentrada de **2.32** metros al final del canal, donde se ubicará la turbina como se observa en la figura 33.

En resumen, aunque el terreno natural tiene una pendiente del 3% y una caída total de 3.3 metros a lo largo de 70 metros, esta caída no es aprovechable directamente. Por lo tanto, se crea una caída artificial mediante un canal con una pendiente del 1% para obtener la altura requerida de 1.5 metros o más en un punto específico, permitiendo así la instalación y operación adecuada de la turbina Turbulent.

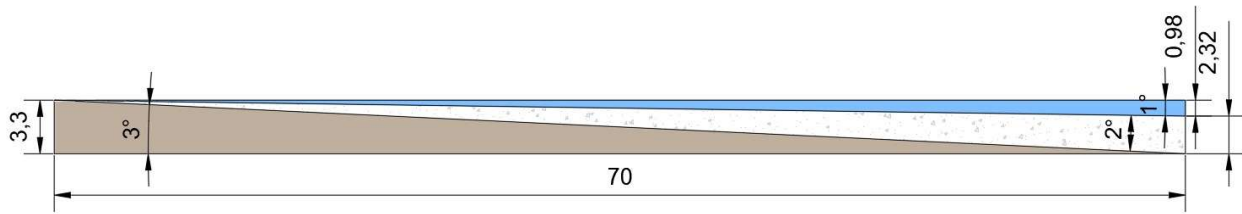


Figura 33. Cabeza final, Pendiente 1.4%. Elaboración Propia

En una longitud de 70 m, medida por medio del equipo Altimetro evaluando la altura de referencia de un punto con otro tal como lo indica el IDEAM, en la figura 33 se observa cómo se pretende aprovechar dicha caída de tal manera que la turbina tenga una cabeza que le permita tener mayor eficiencia y productividad.

5.1.3. Selección de tecnología.

Antes que nada, resulta fundamental reconocer las implicaciones ambientales asociadas a la instalación de una pequeña central hidroeléctrica.

A continuación, se mencionan algunos aspectos relevantes a tener en cuenta:

- Impacto en el ecosistema acuático: La construcción de una PCH generalmente implica la construcción de una presa o represa para desviar el flujo de agua hacia la turbina. Esto puede alterar el hábitat acuático, especialmente aguas arriba de la presa, y afectar la migración de peces y otros organismos acuáticos. Sin embargo, debido a que las PCH no retienen grandes volúmenes de agua, el impacto en la fauna acuática tiende a ser menor que en las centrales hidroeléctricas convencionales.
- Impacto en el caudal del río: La extracción de energía de un río mediante una PCH implica tomar parte del caudal del río para hacerlo pasar por la turbina. Esto puede reducir el caudal aguas abajo de la central, lo que podría afectar a la flora y fauna que dependen del flujo regular del agua. Sin embargo, en comparación con las centrales hidroeléctricas convencionales, las PCH suelen tener un impacto menor en el caudal del río debido a su diseño y capacidad de regulación.
- Emisiones de gases de efecto invernadero: Las PCH son una fuente de energía renovable y no emiten gases de efecto invernadero durante la

generación de electricidad. Esto las convierte en una opción favorable desde el punto de vista ambiental en comparación con las centrales térmicas que queman combustibles fósiles.

- Paisaje y uso del suelo: La construcción de una PCH puede requerir la alteración del paisaje y el uso del suelo, especialmente en el área donde se construye la presa y la central eléctrica. Sin embargo, debido a su tamaño relativamente pequeño, las PCH suelen tener un impacto visual y de uso del suelo más bajo que las grandes represas hidroeléctricas.

En el estado del arte, se lleva a cabo un análisis de las diversas turbinas que pueden ser utilizadas en una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH). Al caracterizar el recurso hídrico, se llega a la conclusión de que el caudal disponible es de $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$, con una cabeza de 2,32 metros de altura. En este contexto, se evalúan tecnologías adecuadas para situaciones de caudal y caída bajas.

Según los tipos de turbinas hidráulicas enunciadas en el marco teórico se realiza una comparación en relación a los datos obtenidos en la caracterización del recurso tal como se observa en la figura 34.

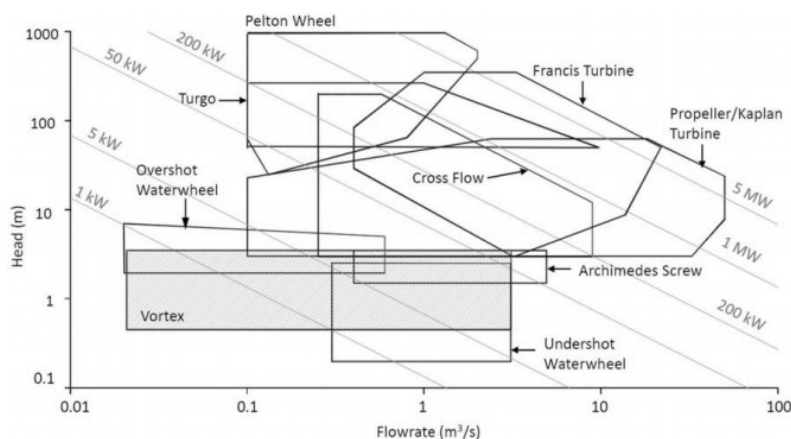


Figura 34. Comportamiento de las turbomáquinas - Turbinas por Altura y caudal bajos [37]

En la Figura 34, se examina el rendimiento de las turbinas en cuanto a la generación de electricidad, centrándose en la relación entre la altura de la caída y el caudal del afluente con el cual operan. Se identifica que la turbina que se destaca en

esta clasificación es la de tipo Vortex, la cual opera en un rango de altura de caída que se encuentra aproximadamente entre 0.8 a 7 metros, con un caudal de aproximadamente 0.05 a 5 m³/s, generando una potencia que oscila entre 1 kW y 50 kW, en consonancia con la disponibilidad del recurso hídrico.

La turbina tipo Vortex se distingue por su capacidad para operar eficientemente incluso con caídas mínimas. En contraste, las demás turbinas requieren caídas superiores, lo que resulta en su exclusión del estudio. En consecuencia, se enfocará en explorar cómo lograr una mayor eficiencia en las turbinas tipo Vortex.

Por tanto, a continuación, se exponen algunos casos de estudio en los cuales se busca obtener información para el proyecto acerca de cómo lograr una generación eléctrica comprometedora con una caída limitada.

El estudio que será analizado se enfoca en la utilización del vórtice gravitacional con el propósito de incrementar el torque de entrada a la turbina. Este torque se refiere al comportamiento del agua en una turbina de vórtice.

5.1.3.1. Caso de estudio 1:

En el estudio se evalúa la eficiencia de la turbina que es capaz de generar energía con baja cabeza y bajo caudal siendo una tecnología ambiciosa e ideal para cualquier cause, ahora bien, el flujo de agua y aprovechamiento del vórtice gravitacional generado cuando el agua se drena del tanque, es de vital importancia no obstante debido a la presencia de una superficie libre en su campo de flujo, se ha complicado determinar su relevancia para la generación de electricidad.

Se realizaron experimentos y análisis numéricos teniendo en cuenta la superficie libre [7]. Los resultados mostraron una correlación entre el torque, la salida de la turbina, la eficiencia y la cabeza efectiva [7].

5.1.3.2. Caso de estudio 2:

El siguiente estudio analiza las características de los remolinos en una cuenca de turbina de agua de vórtice gravitacional (GVWT) utilizando simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) y validación experimental. La GVWT es una tecnología prometedora para la generación de energía

hidroeléctrica de baja altura. El diseño de la cuenca, incluyendo la altura del vórtice, el diámetro del núcleo de aire y la velocidad del agua, se presenta como una consideración clave para determinar el diseño de la GVWT [8], como se observa en la figura 35.

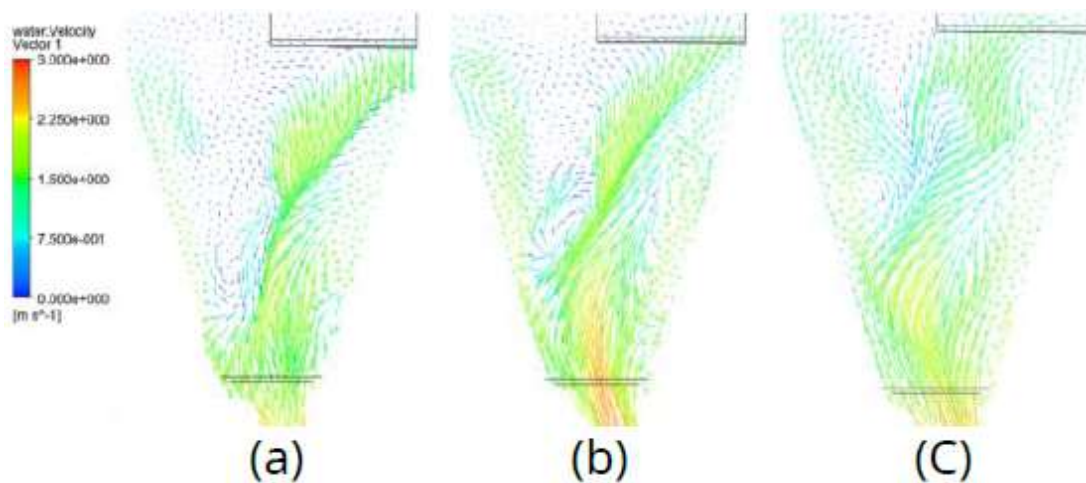


Figura 35. Comportamiento del vórtice [8].

Se encontró que las velocidades tangenciales y axiales aumentan con la profundidad debido a la pequeña sección transversal del estanque cerca de la salida. La cuenca cónica con deflector mejora la estructura de los remolinos, generando remolinos asimétricos y flujos secundarios. El ángulo óptimo del deflector para obtener la velocidad tangencial más alta fue de 19 grados [9]. En conclusión, se recomienda el uso de una cubeta con deflector en la GVWT para mejorar su rendimiento.

5.1.3.3. Caso de estudio 3:

Para finalizar, se analiza el estudio del rendimiento como tal de la turbina y sus componentes, se investiga el rendimiento de una turbina de vórtice de agua gravitacional (GWVT) de etapas múltiples mediante análisis y experimentación. La turbina se ensambla en una cuenca cónica y cada corredor es independiente en términos de generación de energía gracias a la disposición del eje telescópico. Se analizan parámetros de rendimiento como velocidad de rotación, par, potencia y eficiencia en diversas condiciones de carga, teniendo

en cuenta los efectos de los parámetros de diseño como la relación entre los rotores, la distancia de compensación entre corredores vecinos y las etapas internas e intermedias de dos etapas. Se consideran turbinas GWVT de una etapa y de tres etapas.

Se ha observado que en las turbinas de Vórtice Gravitacional de Etapas Múltiples (GWVT), el diseño del perfil de las palas ubicadas aguas arriba contribuye a minimizar la distorsión del vórtice, lo que resulta en una mejora significativa en la capacidad de generación de energía de los corredores ubicados aguas abajo. Se sugiere la adopción de palas inclinadas en un plano vertical cerca del fondo del depósito, así como palas de flujo cruzado en la posición superior. Además, se recomienda seleccionar la relación entre los rotores de los corredores adyacentes de manera que mantengan la misma relación de diámetro entre el rotor y el depósito, con una distancia de compensación óptima [9]. La utilización de múltiples etapas en las turbinas GWVT demuestra una mejora destacada en el rendimiento general en comparación con las turbinas de una sola etapa.

Este estudio tiene relevancia para el diseño y optimización de turbinas GWVT de etapas múltiples, ya que se explora el efecto de varios parámetros de diseño en el rendimiento de la turbina como se observa en figura 36.

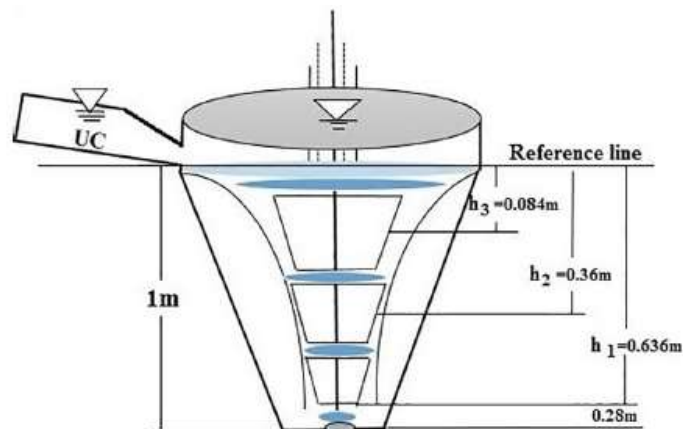


Figura 36. Rendimiento de turbina con vórtice. [9]

Con la información suministrada de los tres casos de estudio, se analiza la posibilidad de obtener energía con caudales pequeños y caídas mínimas. Este aprovechamiento se logra mediante la generación de un vórtice gravitacional a través de una cuenca cónica y el diseño de los alabes en el fondo de la misma.

El funcionamiento de una PCH de vórtice se basa en poder desviar una pequeña cantidad de un afluente por medio de un canal el cual tendrá el recorrido necesario para poder alcanzar la pendiente o caída correspondiente a la producción deseada, en el momento en que se obtiene la pendiente necesaria se instala una turbina dentro de una obra civil adecuada para que se genere el vórtice gravitacional, en el centro del vórtice se genera un vacío que es donde se encuentra el generador con las guardas necesaria para aislarlo del agua.

Luego de generar la energía llega al cuarto eléctrico en donde se realiza la distribución adecuada.

Generación de Vórtice tipo Scroll.

Con el propósito de definir la geometría del canal y del tanque que permitirá generar el vórtice, se procede a calcular cada una de las partes descritas en el marco teórico.

- Conducto vertical: Se desarrollan las ecuaciones descritas con anterioridad obteniendo como resultado los datos visualizados en la tabla 4, la solución de las ecuaciones se encuentra en el anexo 1.

Tabla 4. Dimensiones del conducto Vertical

TURBINA DE VORTICE TIPO SCROLL - DRIOLI	
Conducto vertical	
Variables	Valor
Caudal (m ³ /s)	4,50
Indice de seguridad -n	1,4
Diametro del conducto (m)	1,619
Radio (m)	0,809
Distancia vertical abocinamiento (δ) - (m)	0,162
Distancia horizontal del radio ΔR - (m)	0,162
Ro - (m)	0,971

- Cámara espiral: La cámara se compone por dimensiones horizontales y verticales, en donde se procede a desarrollar las ecuaciones descritas con anterioridad obteniendo como resultado los datos visualizados en la tabla 5 y 6, la solución de las ecuaciones se encuentra en el anexo 1.

Tabla 5. Dimensionamiento Horizontal de cámara espiral

TURBINA DE VORTICE TIPO SCROLL - DRIOLI	
Camara Espiral	
Dimensionamiento Horizontal	
Variables	Valor
a - (m)	0,2
s - (m)	0,200
Base del canal (B) - (m)	2,500
e - (m)	0,386
Radio 1 (R1) - (m)	3,486
Radio 1 (R2) - (m)	2,714
Radio 1 (R3) - (m)	1,94265183
Radio 1 (R4) - (m)	1,557
Radio de cobertura (rx) - (m)	0,12244736
Distancia del Eje del pozo al Eje del canal (Δ) - (m)	2,62122326

Tabla 6. Dimensionamiento Vertical de cámara espiral

TURBINA DE VORTICE TIPO SCROLL - DRIOLI	
Camara Espiral	
Dimensionamiento Vertical	
Variables	Valor
μ - (m)	0,341
ε - (m)	0,510
α - (m)	1,830
β - (m)	1,640
ro - (m)	0,413
h - (m)	1,634

- **Canal de Aproximación:** El canal de aproximación debe ser capaz de regular el flujo o prepararlo antes de ingresar en la cámara para lo que se desarrollan las ecuaciones descritas con anterioridad obteniendo como resultado los datos visualizados en la tabla 7, la solución de las ecuaciones se encuentra en el anexo 1.

Tabla 7. Dimensionamiento Canal de aproximación

TURBINA DE VORTICE TIPO SCROLL - DRIOLI	
Canal de aproximación	
Variables	Valor
Area - (m ²)	3
Velocidad - (m/s)	1,50
Tirante (Y) - (m)	1,22474487
Numero de Froude (Fr) - (m)	0,433
h _v - (m)	0,910
h _o - (m)	0,740
v _o - (m)	1,600
v _v - (m)	1,29
Y (h _v /h _o) - (m)	1,22972973
Altura Grada (S) - (m)	0,373
H _o - (m)	0,871
H _v - (m)	0,995
(ΔH) - (m)	0,124
LB - (m)	2,65044732
LLB - (m)	5,30089465

- **Cámara de disipación:** La cámara de disipación se encarga de regular el fluido después de pasar por la cámara espiral para su posterior disposición, en donde se procede a desarrollar las ecuaciones descritas con anterioridad obteniendo como resultado los datos visualizados en la tabla 8, la solución de las ecuaciones se encuentra en el anexo 1.

Tabla 8. Dimensionamiento de cámara de disipación

TURBINA DE VORTICE TIPO SCROLL - DRIOLI	
CAMARA DISIPACIÓN	
Variables	Valor
L _b	1,619
L _t	6,47482176
B _t	1,942
H _t	2,104

Obteniendo como resultado final el diseño del canal y el tanque de la turbina observado en la figura No.37, en el tramo del brazo del afluente.

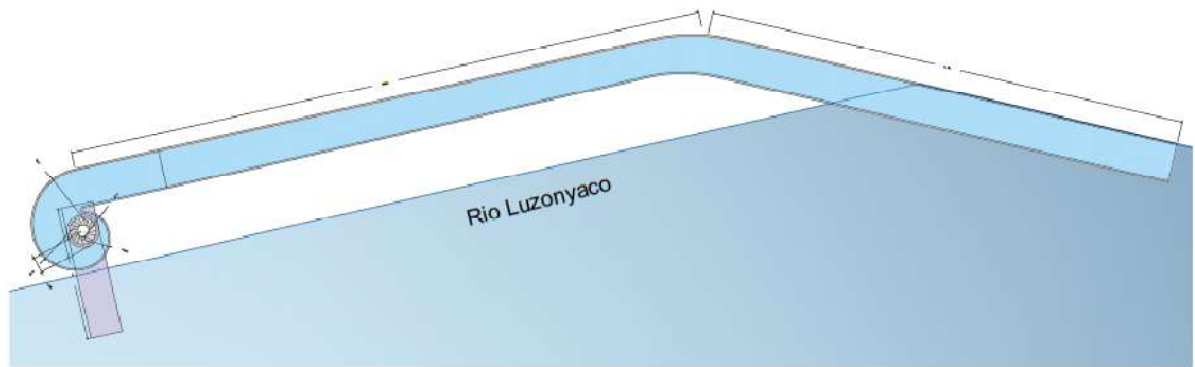


Figura 37. Punto de ingreso y salida del canal. Elaboración propia

Dentro del cual en la figura 38, se puede apreciar a detalle el diseño del pozo o tanque de vórtice, dándole al fluido el control de generar el vórtice con su diseño de espiral y con forma cónica.

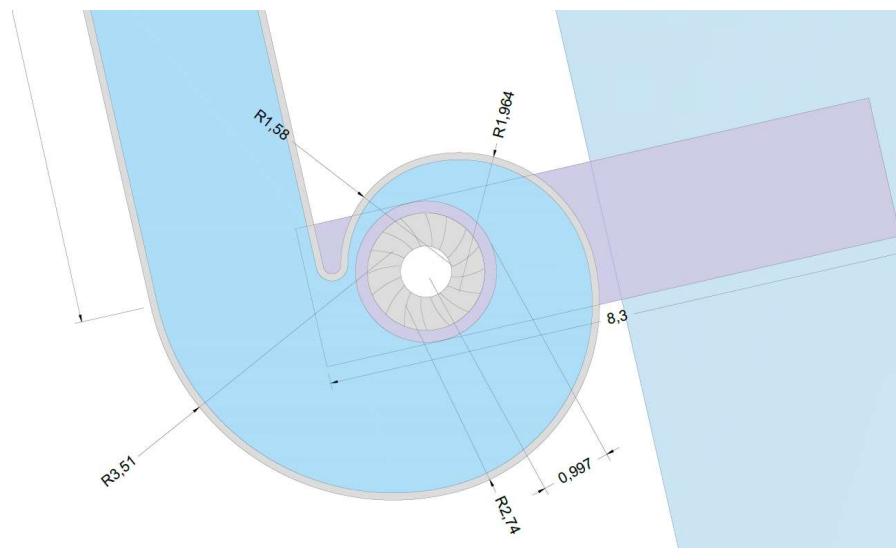


Figura 38. Ubicación de la turbina de vórtice. Elaboración Propia

Obteniendo de esta manera el dimensionamiento del canal y tanque procedemos a identificar cual es el potencial hídrico y el potencial eléctrico dentro del canal.

En primer lugar, se busca conocer cuál es el potencial hídrico del afluente empleando la siguiente ecuación de potencia mecánica específica en donde:

$$P_k = \dot{m} \cdot w_k \text{ [22]}$$

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \text{ [22]}$$

$$w_k = g \cdot h \text{ [22]}$$

En donde:

$P_k =$ Potencia mecánica específica

$\dot{m} =$ Flujo Masico

$w_k =$ Energía específica

$\rho =$ Densidad del agua

$Q =$ Caudal

$g =$ Gravedad

$h =$ Altura de caída

Se comienza identificando el valor del flujo másico, que es igual a:

$$\dot{m} = 998 \frac{kg}{m^3} \cdot 4.5 \frac{m^3}{s} = 4.491 \frac{kg}{s}$$

Luego, se procede a calcular el valor de la energía cinética específica del agua, que es:

$$w_k = 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 2.32m = 22,76 \frac{m^2}{s^2}$$

Con un total de potencia mecánica específica del agua de:

$$P_k = 4.491 \frac{kg}{s} \cdot 22,76 \frac{m^2}{s^2} = 102211,57 \frac{kg \cdot m^2}{s^3} = 102211,57 J \cdot s = 102211,57 W$$

Como resultado final, se obtiene un total de **102,21 kW** disponible de la potencia hídrica del recurso hídrico.

La información proporcionada permite realizar la selección de una turbina suministrada por la empresa Turbulent. Esta empresa se especializa en turbinas de vórtice gravitacional, y las condiciones específicas requeridas para su funcionamiento se encuentran detalladas en la página web de la compañía [12].

Dentro de la ficha técnica de la turbina que genera entre 15 a 70 kWh, se encuentra el mínimo de generación con un caudal 4.5 m³/s como se visualiza en la tabla 3.

Tabla 9. Ficha técnica – Turbulent [21]

Rango estándar HFLH	Min	Max	Und
Flujo	1.5	4.7	m ³ /s
Altura (desde el canal de entrada hasta el nivel de agua en la cola)	1.4	2.7	m
Eficiencia hidráulica en el Punto de Operación Óptimo (BEP, por sus siglas en inglés)	0.65	0.75	-
Profundidad de agua requerida en el canal de entrada	1.3	2.3	m
Diámetro del impulsor	1.3	1.9	m
Velocidad de rotación del impulsor	40	100	rpm

Diámetro del impulsor	1.3 m	1.5 m	1.7 m	1.9 m	Und
Salida hidráulica	17	34	56	78	kW
Salida eléctrica	15	30	50	70	kW
Generación máxima de energía por año	130.000	260.000	440.000	610.000	kWh
Flujo de diseño	1.6	2.5	3.4	4.3	m ³ /s
Altura de diseño	1.7	2.2	2.4	2.6	m
Velocidad de rotación	75	95	75	75	rpm
Dimensiones de la unidad central (l x a x h)	0.8x1.5x1.5	1.2x1.7x1.7	1.5x1.9x1.9	1.8x2.1x2.1	m
Peso del impulsor y soporte	240	380	590	870	Kg
Peso del generador y caja de cambios	310	470	700	1070	Kg
Peso total de la unidad central	550	850	1290	1940	Kg

Ahora bien, la potencia entregada por el recurso hídrico en base a la turbina seleccionada se calcula por medio de la potencia entregada de la turbomáquina empleada, por medio de la siguiente ecuación:

$$P = \rho * Q * g * Hn * \eta \quad [22]$$

Donde:

Hn = Altura neta de caída (m)

η = Eficiencia

La turbina seleccionada de 70 kW es capaz de aprovechar el recurso hídrico disponible, que tiene un potencial de generación de 76.66 kW considerando una eficiencia del sistema del 75%. Aunque la capacidad máxima de la turbina limita la potencia que se puede obtener, los **70 kW** son suficientes para cubrir completamente la demanda pico total del campamento, que también es de 70 kW. Esto significa que la turbina puede suministrar el 100% de la energía requerida por el campamento durante los períodos de máxima demanda, garantizando un abastecimiento confiable y optimizando el aprovechamiento del recurso hídrico.

Ahora bien, se contempló el caudal mínimo y máximo del afluente por lo cual se decide construir el canal a la altura máxima de crecimiento del río con una compuerta que permita graduar el ingreso del agua al canal asegurando de esta manera un control del fluido dentro del mismo.

La información proporcionada permite realizar la selección de una turbina con el detalle visualizado en la figura 39.

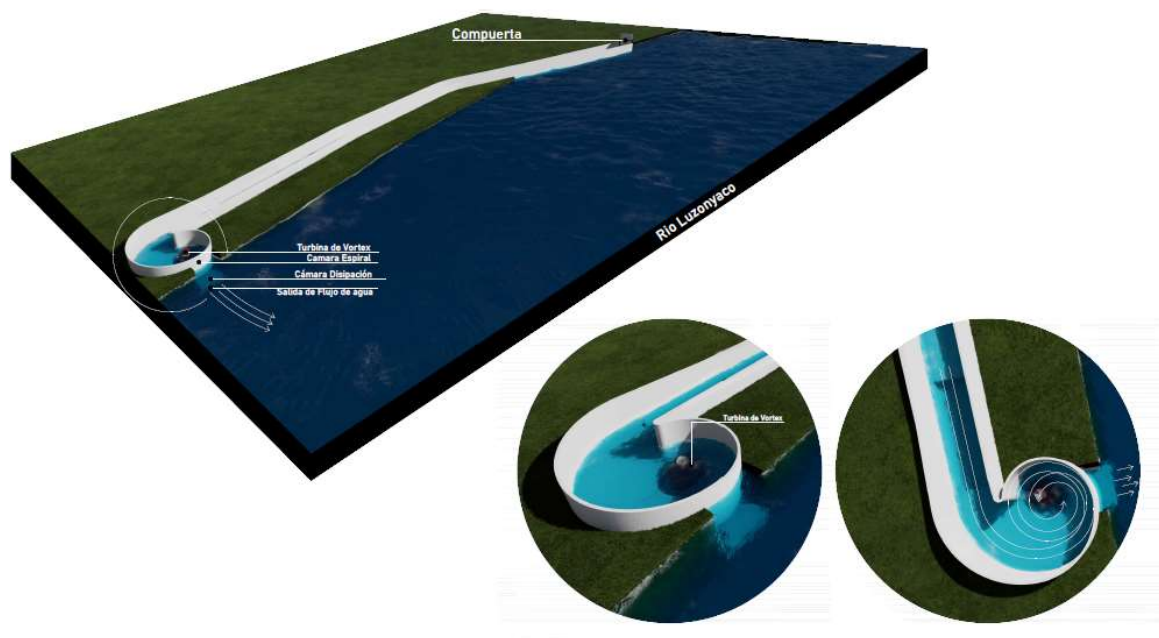


Figura 39. Turbina de vórtice gravitacional.[21]

En conclusión, se ha determinado que una pequeña central hídrica de vórtice gravitacional o Vortex con tecnología de pasada, específicamente la turbina HFLH Vortex Turbine - Turbulent Vortex Turbine, podría satisfacer el 100% de la demanda pico del campamento Orito en condiciones climáticas adecuadas. Esta afirmación se basa en la estimación de la potencia media generada por dicha turbina. Sin embargo, es importante resaltar que en temporadas donde prime el fenómeno de El Niño, el suministro de energía puede verse afectado y presentar variaciones debido a los cambios en las condiciones hidrológicas asociadas a este fenómeno climático.

5.2. ANALISIS ECONOMICO

5.2.1. Descripción de parámetros económicos

Para determinar la inversión inicial, es crucial considerar las variables influyentes que pueden impactar la inversión.

- Magnitud: Se tiene en cuenta el caudal (4,5 m³/s) y la caída de agua disponible (2,32m).
- Demanda: Se refiere al Campamento Orito de Ecopetrol S.A., con una potencia pico de consumo de 70 kW.
- Estimación de inversión: Para calcular el costo de inversión, se consideran los siguientes componentes:
 - ✓ Herramientas y equipos - turbina Vortex con eje vertical
 - ✓ Obra civil
 - ✓ Obra eléctrica
 - ✓ Permisos ambientales
- Estimación de ingresos anuales: Para proyectar los ingresos cuando la planta esté operativa, se toma en cuenta la tarifa del KWh cobrado en la región, igual a \$1.117,01 COP/kWh tal como se observa en la figura 40.



Figura 40. Recibo de la energía del Putumayo S.A.

- Vida útil: Se estima una vida útil promedio de 25 años, con una ejecución efectiva del plan de mantenimiento y operación de la planta, tal como se visualiza en la ficha técnica suministrada por el proveedor [12].

5.2.2. Regulación aplicable

En la investigación dentro de la regulación colombiana, se busca la resolución que se aplique a la obtención de energía mediante fuentes renovables no convencionales, en particular, las pequeñas centrales hidroeléctricas. Estas instalaciones aprovechan el caudal de los ríos y llevan a cabo modificaciones sustanciales en el cauce para generar energía.

En la figura 41, se pueden observar tanto las resoluciones como las leyes aplicables al proyecto.

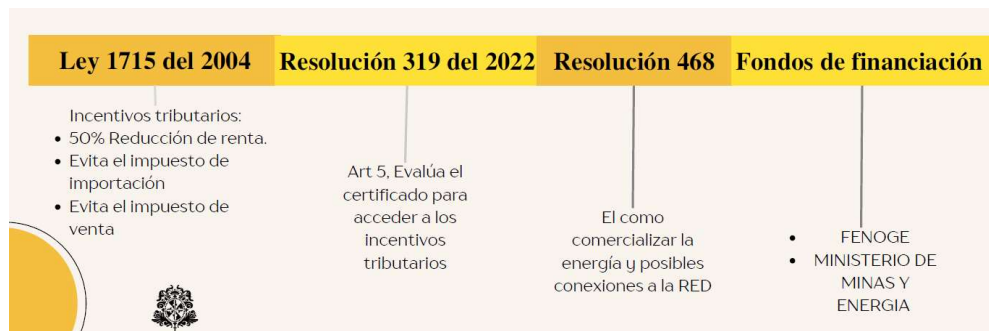


Figura 41. Resolución aplicable al proyecto. Elaboración Propia

Las leyes y resoluciones han sido validadas por la UPME, entidad encargada de la clasificación del método de obtención de energía como FRNC. A continuación, se detallan las leyes mencionadas en la figura:

- Ley 1715 del 2004: La Ley 1715 de 2014, también conocida como "Ley de Energías Renovables No Convencionales" en Colombia, establece un marco legal para promover y regular el desarrollo de las fuentes de energía renovable en el país. A continuación, se proporciona un resumen de los aspectos clave de esta ley:
 - ✓ Objetivo: La ley tiene como objetivo fomentar la diversificación de la matriz energética de Colombia, promoviendo la generación de energía a partir de fuentes renovables no convencionales, como la energía solar, eólica, biomasa, geotérmica, mareomotriz y otras fuentes similares.
 - ✓ Metas de generación: La ley establece metas ambiciosas para aumentar la participación de las energías renovables no convencionales en el sistema eléctrico colombiano. Estas metas se establecen en términos de porcentaje de la capacidad instalada y la generación total de energía.
 - ✓ Beneficios e incentivos: La ley establece incentivos para promover la inversión en energías renovables, incluyendo beneficios tributarios, exenciones arancelarias, acceso preferencial a la red eléctrica, tarifas competitivas y mecanismos de contratación especial para proyectos de generación renovable.

En resumen, la Ley 1715 de 2014 en Colombia busca promover y regular el desarrollo de las energías renovables no convencionales, con el objetivo de diversificar la matriz energética y fomentar la sostenibilidad ambiental y la generación de empleo en el sector energético.

- Resolución 319 del 2022 y 468: Son mecanismos con los cuales se tramitan certificaciones y permisos de ingreso del generador FRNC.

Finalizando con la obtención de fondos de financiación, que permiten la ejecución u gestión de recursos para el proyecto tales como:

- FENOGE-Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía, este fondo, creado mediante el artículo 10 de la Ley 1715 de 2014, permite financiar planes, programas o proyectos destinados a la implementación de plantas de generación de energía eléctrica con FNCER tanto en el Sistema Interconectado Nacional – SIN – como en Zonas No Interconectadas – ZNI entre otro y la Gestión Eficiente de la Energía. El FENOGE tiene dos modalidades de financiamiento: reembolsable (parcial o total) y no reembolsable (parcial o total).

La metodología para la presentación de proyectos que busquen ser financiados con recursos de este fondo se encuentra establecida en el Manual Operativo del FENOGE, expedido mediante la Resolución MME 41407 del 2017 y modificado por la Resolución MME 40104 del 2021. En dicho manual también se especifican los requisitos que deben cumplir los proyectos que se presentan al FENOGE.

- FAZNI: El Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas No Interconectadas fue creado en los artículos 81 al 83 de la Ley 633 de 2000, es administrado por el Ministerio de Minas y Energía, el objetivo de este fondo es financiar los planes, programas y proyectos de inversión en infraestructura energética en las zonas no interconectadas (ZNI). Estos proyectos son evaluados por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas IPSE

5.2.3. Análisis Financiero

Con el propósito de llevar a cabo el análisis financiero, se requiere estimar el presupuesto asociado con la instalación y puesta en marcha de una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH), como se observa en la tabla 10. En este proceso, se consideran factores tales como:

- Campaña de medición: Necesaria para comprender el comportamiento del afluente.
- Instalación de la planta: Incluye adecuaciones civiles y eléctricas, así como la instalación y puesta en marcha de la turbina

Los valores estimados que se encuentran en la tabla 10, hacen referencia a cotizaciones y acercamientos obtenidos con las empresas que prestan dichos servicios.

Tabla 10. Análisis Económico estimado PCH Vortex. Elaboración Propia

ANÁLISIS ECONÓMICO				
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	VR UNITARIO	VR TOTAL
Campaña de medición				
1	Torre de medición hidrometrica	1	\$ 27.800.000	\$ 27.800.000
2	Aforros	10	\$ 196.700	\$ 1.967.000
3	Topografía - Caudal	1	\$ 2.600.900	\$ 2.600.900
Intalación PCH de vortice gravitacional				
1	Turbina tipo Vortex de eje vertical	1	\$ 325.600.000	\$ 325.600.000
2	Obra civil	1	\$ 764.500.000	\$ 764.500.000
3	Obra eléctrica	1	\$ 305.000.000	\$ 305.000.000
4	Permisos ambientales	1	\$ 10.800.000	\$ 10.800.000
Sub-Total				\$ 1.438.267.900
IVA			19%	\$ 273.270.901
Total incluido IVA				\$ 1.711.538.801

El mencionado valor se utiliza posteriormente para evaluar la rentabilidad y la utilidad bruta del proyecto. En el año cero, se lleva a cabo la inversión inicial, y se contempla la posibilidad de realizar un cambio en el equipo rotacional al llegar al decimoquinto año. Este proceso se ejecuta teniendo en cuenta el factor de planta suministrado por el proveedor, que alcanza el 90%. Además, se realiza una comparación con otras tecnologías de generación de energía, como se visualiza en la figura 42. Posteriormente, se realiza un análisis detallado del comportamiento financiero, el cual se presenta en la Tabla 11.

Comparación con energía distribuida



Figura 42. Factor de planta - Turbina Vortex

Analizando los datos mencionados se procede a realizar la rentabilidad del proyecto.

Para evaluar el valor del kilovatio hora generado por una pequeña central hidroeléctrica tipo vórtice scroll, se puede recurrir al concepto propuesto por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). Según IRENA, en el costo asociado a la operación y mantenimiento de una central a pequeña escala, se asume un promedio recomendado del 2.5% de la inversión inicial [40]. Este porcentaje se utiliza como referencia para estimar los gastos anuales relacionados con el funcionamiento y la conservación adecuada de la instalación hidroeléctrica.

Tabla 11. Rentabilidad del Proyecto 25 años vida Útil. Elaboración Propia

RENTABILIDAD DEL PROYECTO - VALOR ACTUAL NETO (VAN)							
Periodo	Inversión	Costos MTTO - OPER	Cantidad KW	Precio KWh - Anual	Factor de Planta	Precio Energía Generación	Utilidad Bruta
0	\$ 1.711.538.801	\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	-\$ 1.542.530.781,52
1		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	-\$ 1.373.522.762,05
2		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	-\$ 1.204.514.742,57
3		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	-\$ 1.035.506.723,09
4		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	-\$ 866.498.703,62
5		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	-\$ 697.490.684,14
6		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	-\$ 528.482.664,66
7		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	-\$ 359.474.645,18
8		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	-\$ 190.466.625,71
9		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	-\$ 21.458.606,23
10		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	\$ 147.549.413,25
11		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	\$ 316.557.432,72
12		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	\$ 485.565.452,20
13		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	\$ 654.573.471,68
14		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	\$ 823.581.491,16
15	\$ 162.800.000,00	\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	\$ 829.789.510,63
16		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	\$ 998.797.530,11
17		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	\$ 1.167.805.549,59
18		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	\$ 1.336.813.569,06
19		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	\$ 1.505.821.588,54
20		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	\$ 1.674.829.608,02
21		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	\$ 1.843.837.627,49
22		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	\$ 2.012.845.646,97
23		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	\$ 2.181.853.666,45
24		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	\$ 2.350.861.685,93
25		\$ 42.788.470	210678,00	\$ 1.117,01	90%	\$ 211.796.490	\$ 2.519.869.705,40
TOTAL	\$ 1.874.338.801	\$ 1.112.500.221					

En el análisis del comportamiento financiero del proyecto, se toman en cuenta variables como:

- Valor KWh -Año
- Consumo KWh – Año
- Mantenimiento y operación – Año
- Factor de planta

Se observa que, para el año 10, ya se produce un retorno a la inversión, como se visualiza en la Figura 43.

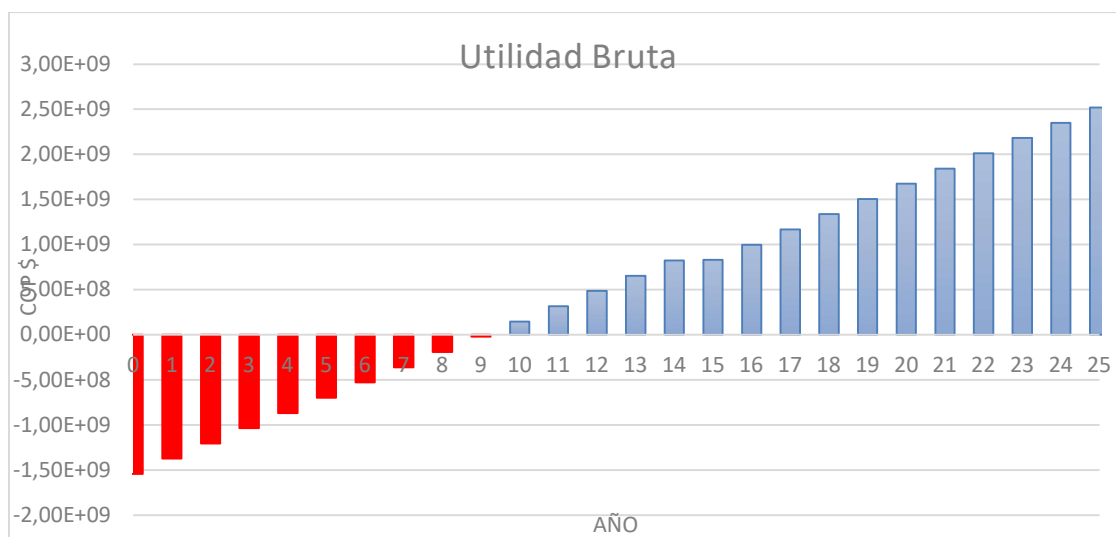


Figura 43. Utilidad Bruta. Elaboración propia

Con el objetivo de concretar el valor del kWh ofrecido mediante la alternativa, se obtiene el siguiente resultado del precio LCOE:

Tabla 12. Precio LCOE

Potencia KW	72,44
Disponibilidad MES	90%
Disponibilidad Anual	10,8
Horas de Mantenimiento	424
Horas anuales x 25 años	218576
Producción de Energía Anual KW	14.250.281
Costo Total	\$ 2.986.839.022
LCOE	\$ 209,60

El resultado es un valor del kWh de \$209,60, el cual, en comparación con la información suministrado por IRENA reportando en el año 2022 [38], visualizado en la figura 45 de \$239,63 KWh, es menor al igual que su impacto ambiental.

En resumen, el precio del kWh generado por una pequeña central hidroeléctrica puede ser menor en comparación con el de una central hidroeléctrica a gran escala debido a varios factores. En primer lugar, las pequeñas centrales requieren una inversión inicial más baja, ya que sus componentes y obras civiles son de menor escala. Además, sus costos de operación y mantenimiento son más reducidos debido a la menor complejidad de los equipos y la infraestructura. Asimismo, el impacto ambiental de las pequeñas centrales hidroeléctricas es generalmente menor, lo que se traduce en menores costos asociados a la mitigación y compensación de los impactos. Por último, su diseño optimizado y su capacidad para aprovechar caudales más pequeños les permiten tener una mayor eficiencia y flexibilidad en la generación de energía, contribuyendo así a un menor costo por kWh generado.



Figura 44. Valor LCOE KWh - Hidroeléctrica convencional. IRENA [38]

En comparación con el valor actual del kWh en la región, el proyecto se muestra rentable para la obtención de energía eléctrica, considerando el retorno de inversión.

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio permitió caracterizar el recurso hídrico dentro del canal diseñado del río Luzanyaco, determinando un caudal promedio de 4,5 m³/s y una caída de 2,32 metros, lo cual representa un potencial para la implementación de una pequeña central hidroeléctrica (PCH).

La demanda energética pico del campamento Orito de Ecopetrol es de 70 kW. Con la tecnología de PCH de pasada con turbina de vórtice gravitacional analizada se podría llegar a cubrir alrededor del 100% de esta demanda, generando 70 KW.

El análisis financiero preliminar indica que el proyecto podría tener una inversión inicial de aproximadamente 1.700 millones de pesos, con un retorno de la inversión entre 7 y 8 años considerando la proyección de ingresos por venta de energía.

Existe un gran potencial para la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en el departamento de Putumayo en Colombia, dado su abundante recurso hídrico. Estas PCH pueden ayudar a diversificar la matriz energética, reducir costos y mejorar la confiabilidad del suministro eléctrico en la región.

La tecnología de turbina de vórtice gravitacional es prometedora para su implementación en PCH de baja caída y bajo caudal en la región. Permite aprovechar eficientemente la energía del agua aún en condiciones limitadas.

El marco regulatorio en Colombia es favorable para proyectos de generación con Fuentes de Energía Renovables No Convencionales. Existen beneficios, incentivos e instancias de financiamiento aplicables al caso evaluado.

Se recomienda ampliar el rango de tiempo de las mediciones del afluente y, de ser posible, se sugiere implementar el método de medición No. 02, que implica la instalación de una estación hidrométrica. Esta estación permitiría evaluar de manera minuciosa el comportamiento del afluente, registrando datos a intervalos de tiempo más cortos y frecuentes, lo que conduciría a una caracterización más completa y oportuna del recurso hidráulico, proporcionando una base sólida para la gestión eficiente y sostenible del afluente en beneficio del proyecto hidroeléctrico y la comunidad circundante.

Como mejora al diseño, se plantea la optimización de las dimensiones del canal y el aumento de su pendiente, con el propósito de incrementar tanto el caudal como la caída disponible para la generación de energía hidroeléctrica. Estas modificaciones permitirán aprovechar al máximo el potencial del recurso hídrico disponible. La ampliación de la sección transversal del canal y el incremento de su pendiente favorecerán un mayor flujo de agua y una mayor caída al ingresar a la turbina de vórtice, incrementando así la potencia hidroeléctrica disponible.

REFERENCIAS

- [1] Areri, D. C., & Bibi, T. S. (2023). Identification of small-scale hydropower potential sites using geographic information system and hydrologic modeling technique: Awata river, Genale Dawa basin, Ethiopia. *Energy Reports*, 9, 2405-2419. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.081>
- [2] ArcGIS Web Application. (s. f.). <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- [3] T, M. R. (s. f.). DANE - Información económica y sociodemográfica desagregada a nivel municipal. <https://www.dane.gov.co/index.php/actualidad-dane/5607-informacion-economica-y-sociodemografica-desagregada-a-nivel-municipal>.
- [4] DANE. (2019). *Pobreza multidimensional por departamentos 2018*.
- [5] Martínez, A. G. (2019). Clima Departamento del Putumayo. todacolombia.com. <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/putumayo/clima.html>
- [6] Clima Putumayo: Climograma, Temperatura y Tabla climática para Putumayo - Climate-Data.org. (s. f.). <https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/putumayo-65/>
- [7] Nishi, Y., & Inagaki, T. (2017). Performance and Flow Field of a Gravitation Vortex Type Water Turbine. *International Journal of Rotating Machinery*, 2017, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2017/2610508>
- [8] Septyaningrum, E., Sutardi, N., & Hantoro, R. (2022). Vortex Characteristic of The Conical Basin for Gravitational Vortex Water Turbine (GVWT). <https://doi.org/10.1109/icue55325.2022.10113544>
- [9] Ullah, R., Cheema, T. A., Saleem, A., Ahmad, S. M., Chattha, J. A., & Park, C. H. (2019). Performance analysis of multi-stage gravitational water vortex turbine. *Energy Conversion and Management*, 198, 111788. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111788>
- [10] GeoHack – Orito (Putumayo).(s.f). [https://geohack.toolforge.org/geohack.php?language=es&pagename=Orito_\(Putumayo\)¶ms=0.6661111111111111_N_-76.87083333333333_E_type:city](https://geohack.toolforge.org/geohack.php?language=es&pagename=Orito_(Putumayo)¶ms=0.6661111111111111_N_-76.87083333333333_E_type:city)

- [11] Ministerio ambiente, , «Protocolo de monitoreo y seguimiento del agua 2021,» 2021.
- [12] Eco-friendly hydropower for everyone, everywhere | Turbulent. (s. f.). Turbulent.
<https://www.turbulent.be/>
- [13] Diego Romero Villafuertes. (2014). Diseño de un conjunto de regulación hídrico para un canal de derivación.
- [14] La matriz energética de Colombia se renueva. (s. f.). BID
<https://www.iadb.org/es/historia/la-matriz-energetica-de-colombia-se-renueva#:~:text=De%20esta%20capacidad%20instalada%2C%20el,%2C%20solar%2C%20y%20biomasa>
- [15] Ecologic Ingeniería. (s. f.). Hidrología Archivos - ecologic. Ecologic.
<https://ecologicingenieria.com/categoria-producto/hidrologia/>
- [16] José Vega Araújo, & Miquel Muñoz Cabré. (2023). *Energía solar y eólica en Colombia: panorama y resumen de políticas 2022*. 1–4.
- [17] Superintendencia de servicios públicos domiciliarios. (2020). *Boletín Tarifario DIRECCIÓN TÉCNICA DE GESTIÓN DE ENERGÍA SUPERINTENDENCIA DELEGADA PARA ENERGÍA Y GAS COMBUSTIBLE*
- [18] Tiempo, R. E. (2009, 13 agosto). Atentado deja sin luz a cinco municipios del Putumayo. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-5846427>
- [19] Fernando Fuentes H. “Análisis y Fundamentación del Modelo Marginalista de Precios Eléctricos en Chile” Asociación gremial de generadoras de Chile, octubre 2014.
- [20] IPSE, & MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA. (2023). *INFORME TELEMETRÍA MENSUAL DE FEBRERO*.
- [21] LA TURBINA VORTICE UNA NUEVA MANERA DE GENERAR ELECTRICIDAD a PARTIR DE LAS CORRIENTES DE AGUA - Donihue Chile. (s. f.). https://apuntesdearquitecturadigital.blogspot.com/2018/06/la-turbina-vortice-una-nueva-manera-de.html#google_vignette
- [22] Frank M. White. (2004). *Mecánica de Fluidos* (Quinta).

- [23] Niebuhr, C. M., van Dijk, M., Neary, V. S., & Bhagwan, J. N. (n.d.). *A review of hydrokinetic turbines and enhancement techniques for canal installations: Technology, applicability and potential.*
- [24] Alejandro Ruiz Sánchez, & Jose Alejandro Posada-Montoya. (2019). *Numerical and Experimental Evaluation of Concave and Convex Designs for Gravitational Water Vortex Turbine.*
- [25] Aamer Sharif, Adnan Noon, Riaz Muhammad, & Waqas Alam. (2023). *Enhancing the performance of Gravitational Water Vortex Turbine through Novel Blade Shape by Flow Simulation Analysis.*
- [26] Energía, R. R. (2019, 10 octubre). Las 10 mayores centrales hidroeléctricas de bombeo del mundo. Bienvenido a Revista RD Energía. <https://revistardenergia.com/las-10-mayores-centrales-hidroelectricas-de-bombeo-del-mundo/>
- [27] Singh, N. (2023, 4 enero). Buscan financiación para una central hidroeléctrica flotante de 500 kW. Energía Estratégica. <https://www.energiaestrategica.com/buscan-financiacion-para-una-central-hidroelectrica-flotante-de-500-kw/>
- [28] Figura 12 centrales de embalse [3] Fuente: Castro, 2012. (s. f.). ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Figura-12-Centrales-de-embalse-3-Fuente-Castro-2012_fig9_334263759
- [29] Figura 11 centrales de pasada [3] Fuente: Castro, 2012. (s. f.). ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Figura-11-Centrales-de-pasada-3-Fuente-Castro-2012_fig8_334263759
- [30] BEonloop. (2023, 3 agosto). GENERADOR ELÉCTRICO con la corriente subacuática. BEonloop. <https://www.beonloop.com/generador-electrico-con-la-corriente-subacuatica/>
- [31] WWS Wasserkraft GmbH. (2020, 26 mayo). Turbina Kaplan - Ingeniería de Turbinas - WWS Wasserkraft GmbH. <https://www.wws-wasserkraft.at/es/productos/turbina-kaplan>

- [32] Turbina hidroeléctrica. (s. f.). Enel Green Power. <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-hidroelectrica/turbina-hidroelectrica>
- [33] Corporativa, I. (s. f.). Energía hidroeléctrica. Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-hidroelectrica>
- [34] Carpio, J. (2023). Diseño de una turbina hidrocínética de vórtice gravitacional para el incremento del recurso hídrico en el distrito de Lari, Arequipa.
- [35] Romero, F., Velásquez, L., & Chica, E. (2021). Consideraciones de diseño de una turbina Michell-Banki. <https://www.redalyc.org/journal/5537/553768365003/html/>
- [36] User, S. (s. f.). Ghiggia - Turbine idroelettriche. Ghiggia. <https://www.ghiggia.it/es/productos/turbinas-francis>
- [37] Ajay Kumar Jha, Deepa Upadhyaya Subedi, & Ashesh Babu Timilsina. (2018). ASSESSMENT OF GRAVITATIONAL WATER VORTEX HYDROPOWER PLANT IN NEPAL.
- [38] IRENA 2, I. R. E. A. A. D. (2023). RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2022.
- [39] CARLOS ANDRÉS CHILUISA SAMANIEGO, & CRISTHIAN ALBERTO GUANOLUISA ERAZO. (2015). VERIFICACIÓN DEL DISEÑO HIDRÁULICO DE UN DISIPADOR DE ENERGÍA TIPO VÓRTICE MEDIANTE MODELO FÍSICO CONSTRUIDO EN LABORATORIO.
- [40] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2021.